

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky



Simulace chlazení kostry elektromotoru

Cooling Simulation of Electromotor Frame

Student:

Bc. Pavel Miňo

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Miňo**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Simulace chlazení kostry elektromotoru**
Cooling Simulation of Electromotor Frame

Zásady pro vypracování:

- 1) Uveďte a popište základní vztahy pro matematický popis proudění a přenosu tepla.
- 2) Poskytnutý geometrický model kostry elektromotoru upravte pro použití ve výpočetním softwarovém balíku Ansys Workbench CFX.
- 3) Na základě geometrického modelu vytvořte vhodný CFD model oblasti, ve které bude uvažováno proudění a přenos tepla, diskutujte možnost použití okrajových podmínek z hlediska možného zjednodušení modelu.
- 4) Na základě daných okrajových podmínek proveďte výpočet s cílem vizualizace proudění v prostoru kolem kostry elektromotoru a určení teplotního pole kostry elektromotoru.
- 5) Na základě dosažených výsledků diskutujte možnosti snížení teploty povrchu kostry elektromotoru.

Seznam doporučené odborné literatury:

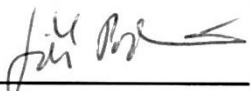
- [1] RODI, W. & FUEYO, N. Engineering Turbulence Modelling and Experiments 5. 1st ed. Oxford : Esvier, 2002. 1010 pp. ISBN 0-08-044114-9.
- [2] PORUBA, Zdeněk; SZWEDA, Jan. Flow Problem in Thermal Motor Analysis. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava : Řada strojní. 2008, vol. LIV, no. 2, s. 109-114. ISSN 1210-0471.
- [3] ANSYS, Inc. Theory Reference [online]. 2004 [cit. 2009-11-01]. Dostupný z WWW: <http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/90/ansys/a_thry90.pdf>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.**


Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Pavel Miňo

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Jana Čapka 3079, Frýdek - Místek 73801

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MIŇO, P. Simulace chlazení kostry elektromotoru. Ostrava: katedra mechaniky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013, 72 s. Diplomová práce, vedoucí: Poruba Z.

Tato práce má za úkol posoudit chlazení a rozložení teplot na kostře elektromotoru pomocí počítačového modelování CFD analýzy. Geometrií je kostra elektromotoru typ 1LG4314-2AB60, kterou spolu s dalšími daty poskytla firma Siemens. Počítačový model pak bude upraven v programu Ansys Workbench 14.5 a samotná analýza provedena v modulu CFX. Výsledkem bude rozložení teplot na používaném typu kostry. Posledním úkolem v závěru práce bude nalézt takové technické řešení, které povede ke snížení teplot na kostře elektromotoru.

ANNOTATION OF DIPLOM THESIS

MIŇO, P. Cooling Simulation of Electromotor Frame, Ostrava: Department of mechanic, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2013, 72 p. Diplom Thesis, head: Poruba, Z.

This study aims to assess the cooling and temperature distribution on the motor frame using computer modeling CFD analysis. Geometry is a skeleton electric type 1LG4314-2AB60, which together with other data supplied by Siemens. A computer model will be modified in the Ansys Workbench 14.5 and the actual analysis is done in the module CFX. This will result in the temperature distribution on the type skeletons. The final task of the present work is to find a technical solution that will reduce the temperature of the chassis motor.

OBSAH

1. Úvod	10
2. Popis proudění a přenosu tepla	11
2.1 Metody řešení	12
2.1.1 Základní rovnice popisující proudění	12
2.1.2 Matematické modely popisující proudění	15
2.1.2.1 Reynoldsovo časové středování	16
2.1.3 RANS modely turbulence	18
2.1.3.1 Boussinesquova hypotéza	19
2.1.3.2 Dvourovnicový k- ϵ model	20
2.2 CFD analýzy proudění	21
2.2.1 Výhody CFD	22
2.2.2 Ansys CFX	23
3. Tvorba počítačového modelu	24
3.1 Zadaný tvar a vlastnosti kostry elektromotoru	24
3.2 Tvorba geometrie počítačového modelu	25
3.3 Rozdělení modelu na konečné prvky	29
3.4 Definování prostředí	32
3.4.1 Solid	32
3.4.2 Fluid	33
3.4.3 Interface	33
3.5 Zadání okrajových podmínek	34
3.5.1 Vstup (Inlet)	34
3.5.2 Výstup (Outlet)	37
3.5.3 Opening	38
3.5.4 Wall	38
3.5.5 Symmetry	39
3.5.6 Teplotní tok	40
4. Výpočet a výsledky	41
4.1 Nastavení a průběh výpočtu	41
4.2 Vyhodnocení výsledků	42
4.2.1 Rozložení teplot na kostře elektromotoru	42
4.2.2 Součinitel přestupu tepla	45

4.2.3 Ohřívání proudícího vzduchu	46
4.2.4 Proudění vzduchu	48
4.2.5 Funkce Yplus	50
4.3 Vyhodnocení výsledků	51
5. Optimalizace kostry elektromotoru	52
5.1 Úprava geometrie modelu	52
5.2 Další nastavení modelu	55
5.3 Výpočet a výsledky	55
5.3.1 Průběh výpočtu	55
5.3.2 Rozložení teplot na kostře elektromotoru	56
5.3.3 Součinitel přestupu tepla	58
5.3.4 Proudění vzduchu	59
5.3.5 Funkce Yplus	61
5.4 Vyhodnocení výsledků	62
6. Porovnání výsledků a shrnutí	62
6.1 Účel optimalizovaného modelu	63
6.2 Rozložení teplot	64
6.3 Shrnutí	65
7. Závěrečné zhodnocení	66
8. Použitá literatura	68
9. Poděkování	70

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Veličina	Označení	Jednotka
x	Prostorová souřadnice	[m]
k	Koeficient molekulární difuze pro danou veličinu	[-]
C	Libovolná veličina (např. hybnost, energie, ..)	[-]
u,v,w	Složky rychlosti	[m/s]
t	Čas	[s]
p	Tlak	[Mpa]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
ν	Kinematická viskozita	[m ² /s]
$f_{x,y,z}$	Složky vnější objemové síly	[N]
T	Termodynamická teplota	[K]
c_p	Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	[J/(kg.K)]
α	Teplotní vodivost	[-]
l	Délkové měřítko	[m]
ε	Rychlost disipace	[m ² /s ³]
k	Turbulentní kinetická energie	[m ² /s ²]
E	Youngův modul pružnosti	[Mpa]
μ	Poissonovo číslo	[-]
\dot{v}	Hmotnostní průtok	[kg/s]
S	Vstupní ploch	[m ²]
v	Vstupní rychlost	[m/s]
v_{ax}, v_{rad}, v_{th}	Složky vstupní rychlosti v cylindrickém souř.s.	[m/s]
q	Teplotní tok	[W/m ²]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
V	Objem	[m ³]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W/(m.K)]

1 Úvod

V této práci se sleduje chlazení kostry elektromotoru pomocí vzduchu foukaného z ventilátoru v přední části. Model bude laděn podle dat získaných od zadavatele.

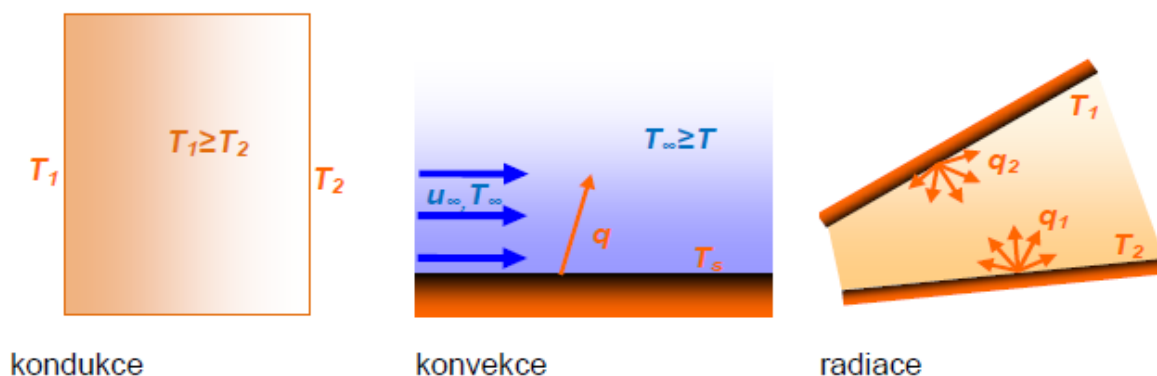
Účelem této práce je vytvořit funkční model kostry elektromotoru se správně zadanými okrajovými podmínkami a jeho podrobné zkoumání. K vytvoření tohoto modelu bude použita CFD analýza, konkrétně program Ansys Workbench 14.5 a jeho modul CFX.

Cílem práce je pak na původní kostře elektromotoru získané od zadavatele najít nedostatky a slabé místa co se chlazení týče a navrhnout technické řešení vedoucího k jejich odstranění nebo minimalizaci.

2 Popis proudění a přenosu tepla

Proudění a přenos tepla je základní problém termomechaniky. Tento přenos probíhá v daném systému a jeho okolí a tato interakce se nazývá práce a teplo. Obtížnost popisu tohoto procesu se však výrazně zvýší, když se přenos tepla uskutečňuje v závislosti na měnících se podmínkách a na čase. Samotným přenosem tepla se rozumí změna tepelné energie v důsledku existence tepelné difference. Tato difference může existovat v rámci jednoho prostředí nebo mezi více médii. Existují 3 typy přenosu tepla:

- a) **Kondukce** – vedení v pevné látce (Je-li zahříván jeden konec kovové tyče, pozorujeme, že se postupně zvyšuje teplota i těch částí tyče, které nejsou přímo v plamenu. Uvnitř tělesa probíhá tepelná výměna, při které přechází vnitřní energie z míst o vyšší teplotě na místa s teplotou nižší.)
- b) **Konvekce** – mezi povrchem pevné látky a proudící tekutiny (Pohybem hmoty dochází k vzájemnému pohybu jednotlivých částí, které mají odlišnou teplotu a tedy různou hustotu vnitřní energie, a tím se přenáší teplo.)
- c) **Radiace** – sálání (Fyzikální proces, při kterém látka emituje do prostoru energii ve formě elektromagnetického záření. Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním se může prostřednictvím sálání teplo přenášet i ve vakuu, tzn. bez zprostředkování přenosu látkovým prostředím. [2])



Obr.1 Kondukce, konvekce a radiace [1]

2.1 Metody řešení

2.1.1 Základní rovnice popisující proudění

Základní rovnice popisující problém proudění jsou všechny rovnice o zachování. Konkrétně se jedná o rovnice popisující zákony zachování hmoty, energie a hybnosti. Jelikož se vždy jedná o konvekčně difuzní rovnici, jsou tyto formálně stejné.

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \cdot C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial C}{\partial x_j} \right),$$

Rov.1 Konvekčně difuzní rovnice [3]

kde: C - libovolná veličina (např. hybnost, energie, ...),
k - koeficient molekulární difuze pro danou veličinu,
x - prostorová souřadnice.

Aplikací zmíněných fyzikálních veličin na konvekčně difuzní rovnici jsou získány základní rovnice termomechaniky:

a) **Hybnost** – jsou aplikovány 3 složky hybnosti $m^*(u,v,w)$ a po úpravách získány Navier-Stokesovy rovnice a tedy zákon zachování hybnosti.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \end{aligned},$$

Rov.2 Navier-Stokesovy rovnice [3]

kde: u,v,w - složky rychlosti,
t - čas,
p - tlak,
ρ - hustota,

- ν - kinematická viskozita,
 $f_{x,y,z}$ - složky vnější objemové síly.

Hybnost těchto rovnic je ovlivněna kinematickou viskozitou, kde první člen rovnice představuje zrychlení tekutiny a zbylé tři pak zastupují konvektivní zrychlení, což u vyšších Reynoldsových čísel (u turbulentního proudění) způsobuje nestabilitu rovnice.

- b) **Hmota** – do konvekčně difuzní rovnice je dosazena konstantní hustota a veličina C je definována jako $C=1$.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

Rov.3 Zákon zachování hmoty [3]

kde: u,v,w - složky rychlosti.

Zákon zachování hmoty říká, že množství hmoty, které do objemu vstupuje musí v tomtéž okamžiku i vytéct.

- c) **Teplota** – pokud je do konvekčně difuzní rovnice aplikována jako veličina teplota a opět bude uvažována konstantní hustota, vzniká rovnice vedení tepla (zákon zachování energie).

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = & \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ & + 2\alpha \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + \\ & + \alpha \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) \end{aligned},$$

Rov.4 Zákon zachování energie [3]

- kde: u,v,w - složky rychlosti,
 t - čas,
 T - termodynamická teplota,
 ρ - hustota,
 c_p - měrná tepelná kapacita za stálého tlaku,

α - teplotní vodivost.

Vedení tepla je u těchto rovnic ovlivněno teplotní vodivostí. V prvním členu je vyjádřena akumulace tepla v kapalině, ve zbylých pak konvekce v důsledku proudění. První člen pravé strany vyjadřuje kondukcii a ostatní pak teplo vyvolané deformací a pohybem tekutiny.

Jelikož jsou tyto rovnice poměrně velké a jejich zápis zdlouhavý, využívá se v termomechanice tzv. **Einsteinův sumační teorém**. Jedná se o princip indexování rovnic tak, že index i je použit pro složku vektoru a j označuje sčítací index. Takto lze upravit všechny výše zmíněné rovnice:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

Rov.5 Upravená rovnice kontinuity [3]

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i$$

Rov.6 Upravené Navier-Stokesovy rovnice [3]

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_j T)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + \alpha \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right)^2$$

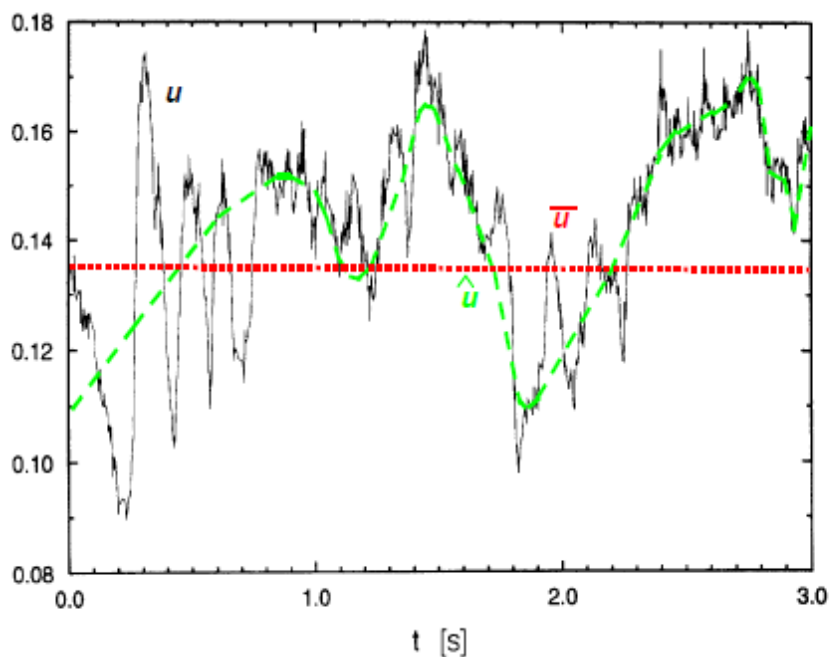
Rov.7 Upravená rovnice vedení tepla [3]

Soustava rovnic jako je ta výše popsaná je pro analytické řešení příliš složitá a při aplikaci na reálný problém neřešitelná. Proto je jedinou možností použít vhodné numerické metody.

2.1.2 Matematické modely popisující proudění

Matematické modelování proudění je v současné době rychle se vyvíjející oblast a to hlavně díky rozvoji výpočetní techniky a novým poznatkům v matematice. Co se týká turbulence, není to zatím plně popsáný jev, a proto se využívá zjednodušených matematických modelů pro popis proudění v inženýrských úlohách. Neexistuje jeden univerzální model, naopak je celá řada modelů a každý s jinou vhodností použití pro konkrétní problémy. Je pak na citu a zkušenostech řešitele jak k úloze přistoupí. V podstatě však existují 3 základní přístupy pro modelování:

- a) **Metoda přímé numerické integrace (DNS-Direct Numerical Simulation)** – pravděpodobně nejvěrnější metoda, která nezjednodušuje základní matematické rovnice. Bohužel však minimální velikost elementu musí být aspoň jako velikost nejmenších vírů vznikajících v modelu a tím pádem jsou v současné době nároky na výpočetní techniku prakticky nereálné.
- b) **Metoda velkých vírů (LES-Large Eddy Simulation)** – tato metoda funguje na principu modelování velkých vírů a jejich zachycení pomocí výpočetní sítě. Velké víry se však rozpadají na menší až k těm úplně nejmenším, jejichž rozpadem dochází k disipaci energie. U této metody jsou tyto malé víry parametrizovány a filtrovány. Metoda je v současné době řešitelná pomocí stávající výpočetní techniky.
- c) **Metoda Reynoldsova časového středování Navier-Stokesových rovnic (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations)** – Metoda, která pomocí statistiky zjednodušuje základní rovnice. V současné době metoda aplikovaná na většinu inženýrských problémů včetně toho, který je předmětem řešení této diplomové práce.



Obr.2 Metody řešení turbulentního proudění [3]

2.1.2.1 Reynoldsovo časové středování

Základem této metody je zjednodušení interpretace turbulentního proudění, které se vyznačuje náhodným charakterem. Veškeré fyzikální veličiny proudění (tlak, rychlost, teplota, ...) jsou náhodné veličiny času. Existují však statistické metody, díky kterým lze proudění interpretovat jako stabilní s poměrně vysokou dávkou přesnosti. Skutečností, že pokud vytvoříme průměrnou hodnotu v různých časových okamžicích a z různých dlouhých časových záznamu dostaneme vždy tutéž hodnotu si všimnul Osborn Reynolds.

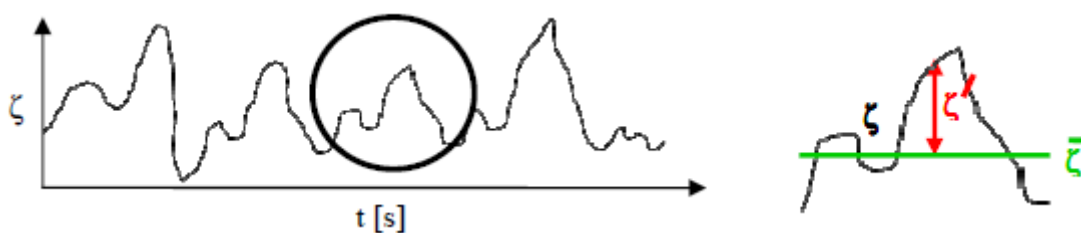
Princip metody – jakoukoliv zkoumanou veličinu ζ v turbulentním proudu lze rozdělit na střední hodnotu $\bar{\zeta}$ a fluktuaci ζ' .

Zároveň s tím pak musí platit:

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{T} \int_0^T \zeta dt \quad \overline{\zeta'} = 0$$

Rov.8 Podmínka platnosti metody [3]

kde: $\bar{\zeta'}$ - průměrná hodnota fluktuací
 T - čas



Obr.3 Průběh veličiny, její střední hodnota a fluktuace [3]

Pomocí této metody jsou upraveny všechny základní rovnice. Při jejich úpravách je využito následujících pravidel:

$$\begin{aligned} \overline{\overline{\zeta}} &= \overline{\zeta}, \quad \overline{\zeta + \zeta'} = \overline{\zeta} + \overline{\zeta'} = \overline{\zeta}, \quad \overline{\zeta \cdot \zeta'} = 0, \quad \overline{\zeta + \psi} = \overline{\zeta} + \overline{\psi}, \\ \overline{\zeta \cdot \psi} &= \overline{\zeta} \cdot \overline{\psi} + \overline{\zeta' \cdot \psi'}, \quad \frac{\partial \overline{\zeta}}{\partial x} = \frac{\partial \overline{\zeta}}{\partial x} \end{aligned}$$

Rov.9 Pravidla pro úpravy rovnic na metodu Reynoldsova středování [3]

Středování rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j} = 0$$

Rov.10 Středovaná rovnice kontinuity [3]

Středování Navier-Stokesových rovnic

$$\frac{\partial (\overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u_i \cdot u_j})}{\partial x_j} + \frac{\partial (\overline{u_i' \cdot u_j'})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\overline{p})}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 (\overline{u_i})}{\partial x_j^2} + \overline{f_i}$$

Rov.11 Středované Navier-Stokesovy rovnice [3]

Středované rovnice kontinuity a NS rovnice dávají dohromady soustavu rovnic souhrnně nazývanou jako **Reynoldsovy rovnice**. V těchto rovnicích už není proudění jen náhodnou funkcí času.

Nejdůležitější však je zmínit nový člen $\overline{u_i' \cdot u_j'}$, který po vynásobení hustotou dává tzv. tensor Reynoldsových napětí.

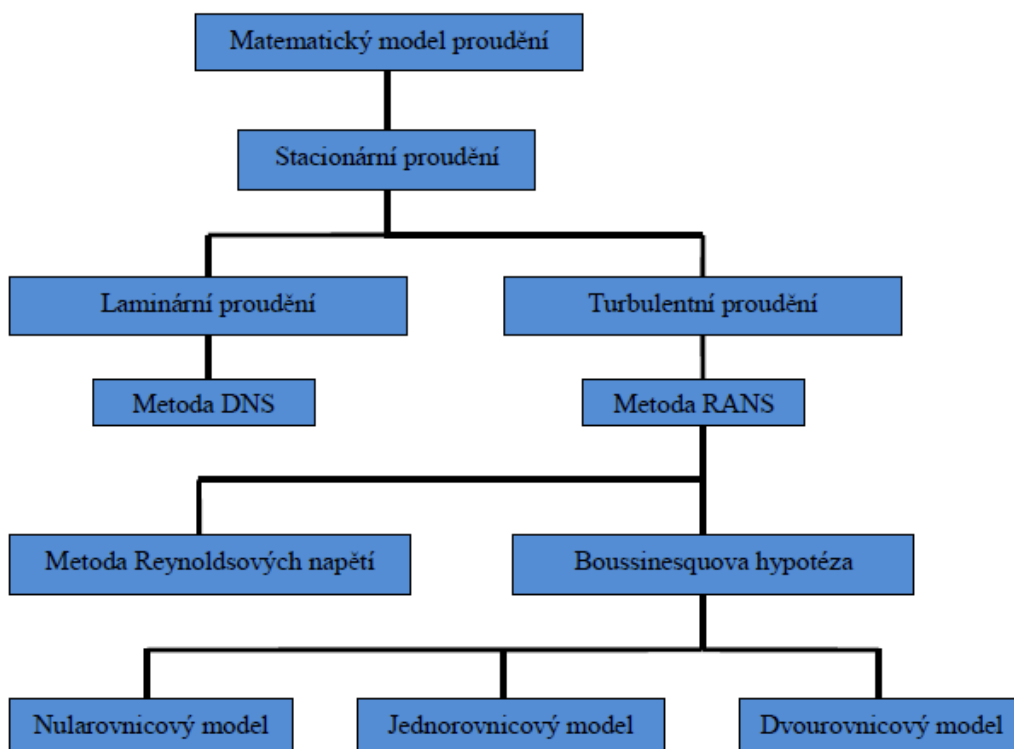
$$\tau_{ij} = \rho \cdot \begin{bmatrix} \overline{u' \cdot u'} & \overline{u' \cdot v'} & \overline{u' \cdot w'} \\ \overline{v' \cdot u'} & \overline{v' \cdot v'} & \overline{v' \cdot w'} \\ \overline{w' \cdot u'} & \overline{w' \cdot v'} & \overline{w' \cdot w'} \end{bmatrix}$$

Rov.12 Tensor Reynoldsových napětí [3]

Pomocí Reynoldsova středování byla soustava velice obtížně řešitelných rovnic o 5ti neznámých nahrazena soustavou výrazně jednodušších rovnic o 5ti neznámých a 6ti novými turbulentními napětími. Modelování proudění pomocí RANS spočívá právě ve volbě metody výpočtu tensoru Reynoldsových napětí.

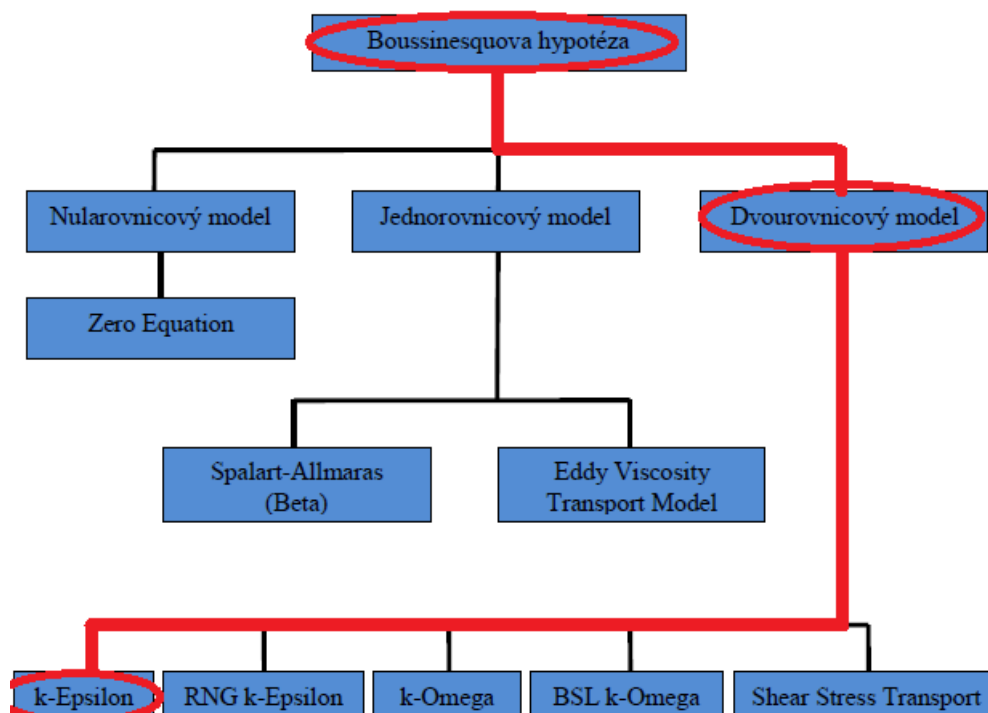
2.1.3 RANS Modely turbulence

Rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním je v přítomnosti Reynoldsova napětí ve středovaných N-S rovnicích turbulentního proudění. To pak nemá uzavřený systém rovnic jako tomu je u proudění laminárního. Proto musíme k pohybovým rovnicím přidat další přídavné rovnice a empirické vztahy a utvořit tak řešitelný systém rovnic. Takový systém se pak nazývá modelem turbulence. Existuje spousta modelů turbulence rozdělených přibližně takto:



Obr.4 Metody modelování stacionárního proudění [3]

Jelikož popis všech modelů by byl časově i matematicky náročný a zdlouhavý, dále budou zmíněny jen pojmy úzce související s tématem práce (obtékání elektromotoru). U něj je využito schématu:



Obr.5 Model využitý v diplomové práci [3]

2.1.3.1 Boussinesquova hypotéza

Základem matematických modelů turbulence, hlavně těch jednodušších, je popis lokálního stavu turbulence vírovou (turbulentní) viskozitou. Je vyjádřena pomocí rychlostního měřítka u a délkového měřítka l , pro které platí:

$$\mu_t \approx l \cdot u$$

Rov.13 Rovnice vírové viskozity [4]

Jednotlivé modely turbulence fungují na principu vyjádření turbulentního napětí a toků skalárních veličin pomocí zvoleného měřítka a následném určení rozložení tohoto parametru v proudovém poli.

Převážná část modelů využívá Boussinesquovy hypotézy o vírové viskozitě, která předpokládá úměrnost turbulentních napětí a toků gradientům střední rychlosti, teploty, tlaku apod. Vírová viskozita však na rozdíl od laminárního proudění již není fyzikální

vlastností proudící tekutiny, ale samotného proudění. Je silně závislá na velikosti turbulence a v rozsahu proudového pole se může výrazně měnit.

Z hlediska modelování turbulentní viskozity v proudovém poli lze rozdělit modely turbulence do 3 skupin, a to na nularovnicové (algebraické), jednorovnicové a dvourovnicové modely, které jsou nazvané podle počtu doplňujících diferenciálních rovnic.

2.1.3.2 Dvourovnicový k-ε model

Model k-ε, který je použit při řešení této diplomové práce řeší kromě diferenciální rovnice pro turbulentní **kinetickou energii k** ještě druhou diferenciální rovnici pro délkové měřítko l_t .

Délkové měřítko l_t je stejně jako kinetická energie také ovlivněno pohybem tekutiny a historických procesech v ní. Druhá diferenciální rovnice v podstatě řeší **rychlost disipace ε**, odtud název modelu k-ε.

Model k- ε je postaven na soustavě rovnic:

- Středovaná rovnice kontinuity,
- 3 středované Navier-Stokesovy rovnice,
- středovaná rovnice energie,
- rovnice pro turbulentní kinetickou energii,

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

Rov.14 Rovnice turbulentní kinetické energie [1]

- rovnice pro rychlost turbulentní disipace,

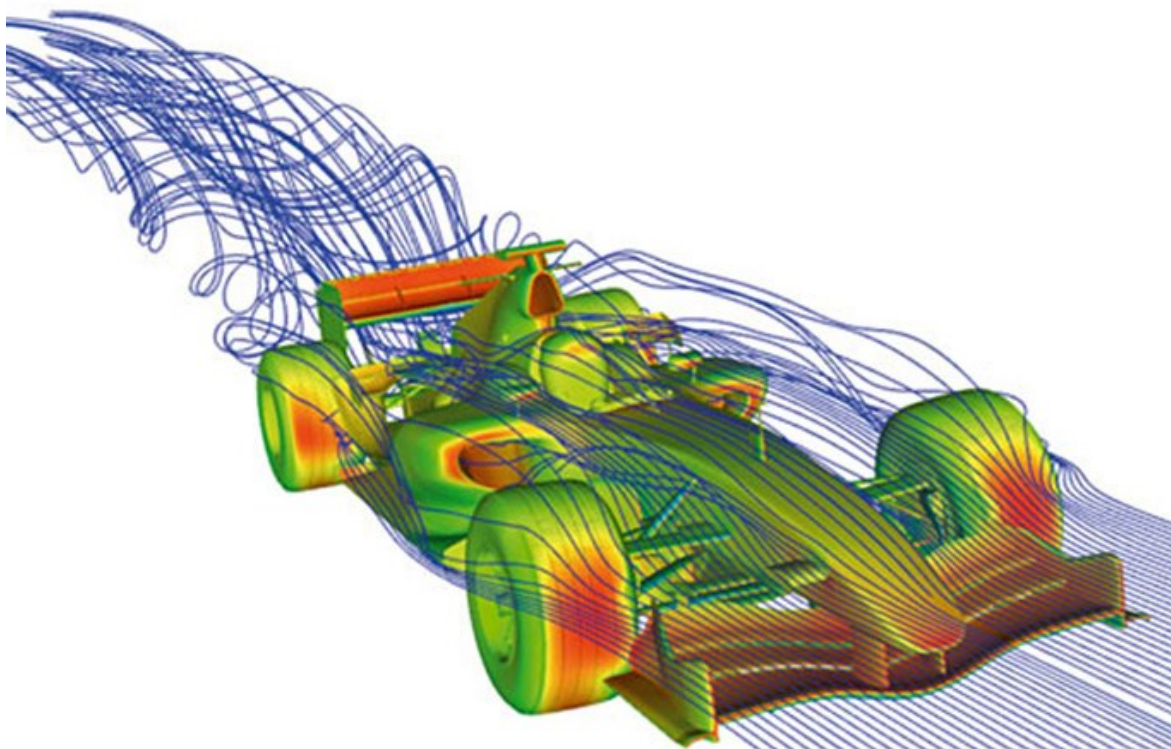
$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i \partial u'_i}{\partial x_j^2} = C_D \frac{k^{3/2}}{l}$$

Rov.15 Rovnice rychlosti turbulentní disipace [1]

- empiricky určené konstanty.

2.2 CFD analýza proudění

CFD je zkratka anglického výrazu **Computational Fluid Dynamics**, který v překladu do češtiny znamená přibližně počítačová dynamika tekutin. Jedná se vlastně o počítačovou simulaci proudění, přestupu tepla, chemických reakcí a dalších procesů. Pro analýzu úlohy, řešené v této práci byl zvolen program ANSYS CFX.



Obr.6 Problém řešený pomocí CFD analýzy [5]

Řešení úloh pomocí počítačového modelování lze obecně rozdělit do následujících kroků:

- vytvoření geometrie,
- vytvoření výpočetní sítě,
- definování okrajových podmínek,
- numerické řešení úlohy,
- vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.

Toto schéma řešení se většinou po posledním kroku ještě mnohokrát opakuje, dokud u modelu citem a zkušenostmi nevykládíme všechny nepřesnosti a možné chyby.

2.2.1 Výhody CFD

Poslední desetiletí se odehrává již ve znamení obrovského rozmachu CFD, prostředky investované do CFD rostou meziročně v řádu desítek procent. Dnes již dávno není matematickou ekvilibristikou bez smysluplného využití, ale naopak přináší elegantní a ekonomickou alternativu standardním vývojovým metodám v oblasti mechaniky tekutin, kde se donedávna i ti největší neobešli bez výroby složitých prototypů či nákladného testování v aerodynamických tunelech. Dostupná technologie prokazatelně zefektivňuje vývoj i významně zlevňuje finální produkci, a stává se tak klíčovou konkurenční výhodou [6].

Počítačová dynamika tekutin má v porovnání s případným experimentálním měřením v aerodynamických tunelech několik výhod [5]:

- 1) Významně redukuje čas potřebný pro výzkum a vývoj.

Příklad: Stáj Formule 1 Renault k devátému závodu sezóny přivezla již osmou odlišnou verzi předního křídla (mj. jeho údajně již 42. iteraci). To by bylo ještě před pár lety absolutně nemyslitelné. Týmy nové díly představily 2 x - 3 x za sezónu - nyní vozí nové díly na každý závod a svůj vůz přizpůsobují "na zakázku" každému okruhu.

- 2) Nahrazuje finančně náročnější nebo z různých důvodů nerealizovatelná testování skutečného modelu.
- 3) Spotřebuje méně energie, než které je potřeba pro provoz aerodynamický tunelů - byť spotřeba super-počítačů o několika tisících procesorech je vysoká, je přesto mnohem nižší než spotřeba tunelů při provozu a z jejich stoupající efektivitou stále klesá a přispívá k ekologii.

2.2.2 Ansys CFX



Obr.7 Logo programu ANSYS CFX

Program **ANSYS CFX** představuje komplexní program pro simulaci problému spojených s prouděním tekutin (vícefázových, reagujících) se zahrnutím vlivu tepla (vedení, konvekce, radiace).

Program CFX je CFD řešič náležející do programové nabídky společnosti ANSYS a v současné době je optimalizován pro práci v rozhraní ANSYS Workbench. To umožňuje komplexní práci s celým modelem v pohodlném a uživatelsky velice příjemném prostředí.

CFX je stejně jako program Fluent založen na řešení základních rovnic metodou konečných objemů. Program vznikl v polovině 80. let ve Velké Británii. Na přelomu tisíciletí si jeho potenciálu všimnul softwarový gigant ANSYS a odkoupil jej. Program pracuje pod celou řadou operačních systémů ve 32- i 64-bitových verzích.

Výhody programu ANSYS CFX podle jeho výrobce [7] :

- Spolehlivý výpočet bez ohledu na velikost nebo rozsah úlohy
- Jeden řešič pro všechny aplikace
- Rychlé výsledky díky vynikající paralelizaci výpočtu a výkonných nástrojů pro konvergenci úlohy
- Pružnost při vytváření vlastních postupů a modelů
- Realistické zobrazování výsledků, excelentní kvalitativní a kvantitativní zpracování spočtených hodnot
- Otevřená struktura programu navržená pro další bezproblémové rozšíření jeho možností
- Plná matice. Maximální možná kombinace fyzikálních modelů mezi jednotlivými oblastmi.

3 Tvorba počítačového modelu

3.1 Zadaný tvar a vlastnosti kostry elektromotoru

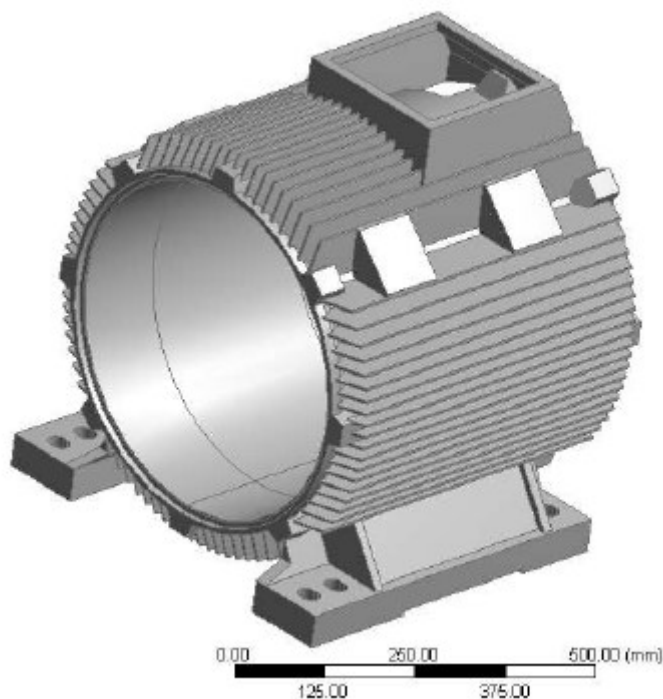


Obr.8 Elektromotor typ 1LG4314-2AB60 [8]

Elektromotor typ 1LG4314-2AB60 zobrazený na obr.8 je předmětem této diplomové práce. Motor je vyráběný firmou SIEMENS a od té také pochází všechny vstupní data, včetně počítačového modelu kostry tohoto motoru, viz obr. 9.

Elektromotor je vyroben ze šedé litiny s hodnotami parametrů:

- Youngův modul pružnosti $E = 110 \text{ GPa}$,
- Poissonovo číslo $\mu = 0,28$,
- Hustota $\rho = 7200 \text{ kg.m}^{-3}$.



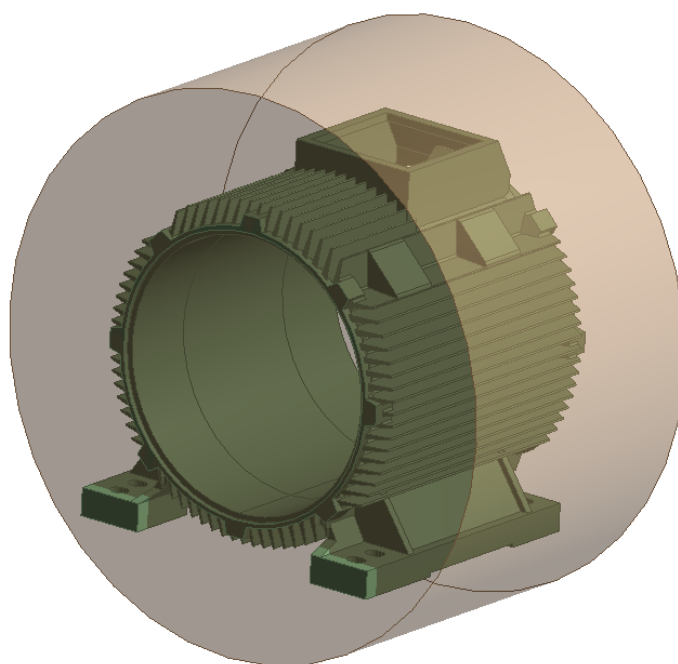
Obr.9 Model kostry elektromotoru [8]

3.2 Tvorba geometrie počítačového modelu

Pomocí zadaného modelu kostry elektromotoru bude vytvořena geometrie pro počítačovou simulaci proudění. K dodané kostře bude třeba vytvořit i model prostředí, ve kterém bude proudit vzduch – tzv. FLUID.

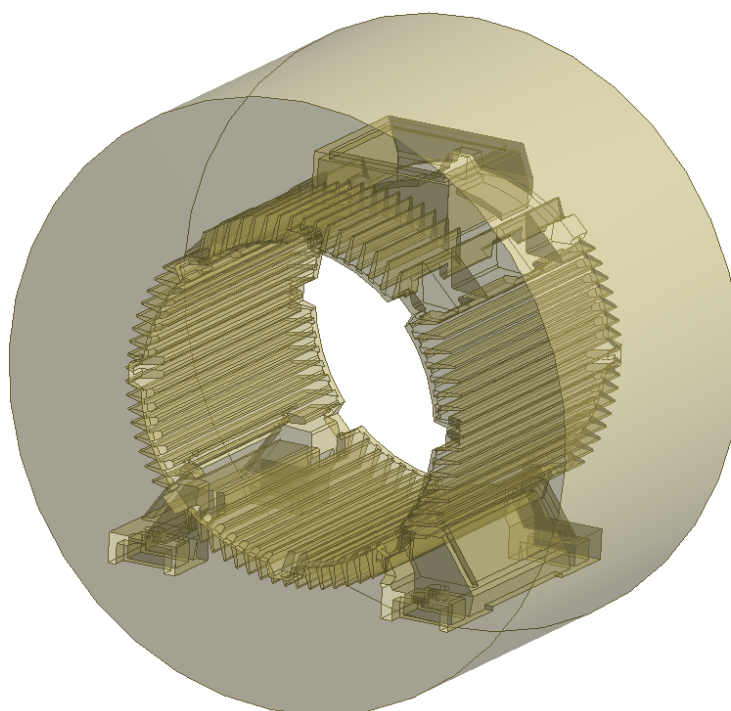
Tato část modelu byla vytvořena v několika krocích. Nejdříve byl kolem kostry elektromotoru v celé její šířce vymodelován válec s dostatečným průměrem, aby zachytil veškeré jevy a proudy, které kolem modelu později vzniknou - viz obr. 10. Následně byla od tohoto válce pomocí funkce Boolean – Subtract odečtena kostra motoru a ve válci tak vznikl její otisk - viz obr. 11. Celý válec byl seříznut o několik objemů včetně dna, kde bude proudící plocha ohraničená podloží - viz obr. 12. Dále byl na stranu ventilátoru připojen krátký válec s průměrem odpovídajícím jeho lopatkám, na jehož přední část budeme později definovat vstupní proud vzduchu - viz obr. 13. Pomocí funkce Imprint faces byly do vnitřní části modelu kostry vtištěny plochy na které budou v budoucnu definovány teplotní toky.

Nakonec byl celý model rozdělen podélně napůl - viz obr. 14. Zde bylo využito symetrie úlohy a díky tomuto kroku bude konečnoprvkový model o polovinu menší a tím i všechny výpočty mnohem rychlejší.



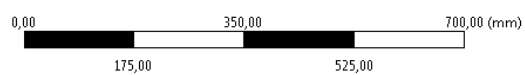
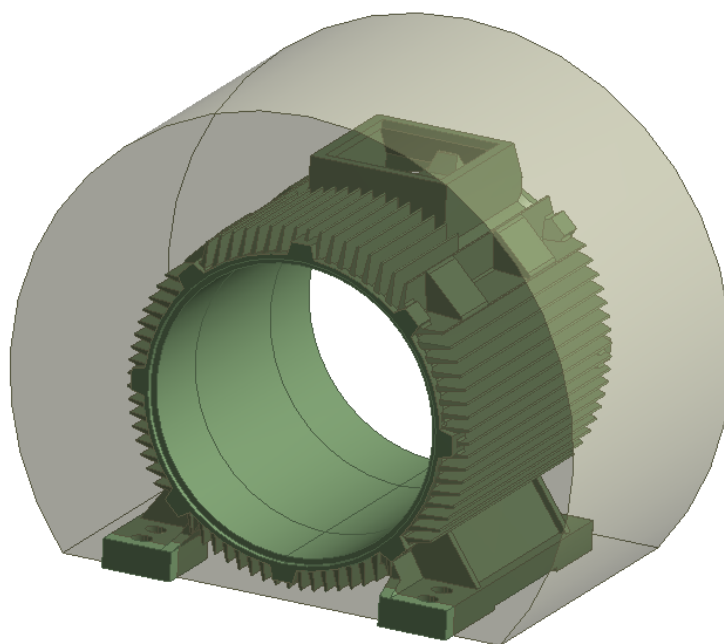
0,00 175,00 350,00 525,00 700,00 (mm)

Obr.10 *Tvorba geometrie 1*

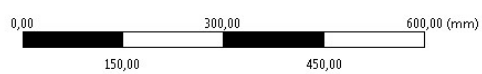
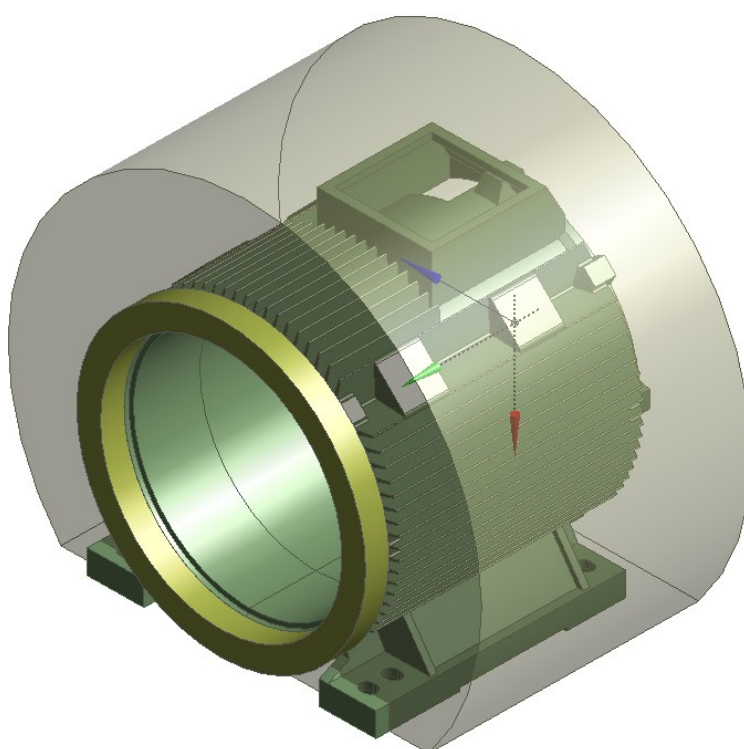


0,00 150,00 300,00 450,00 600,00 (mm)

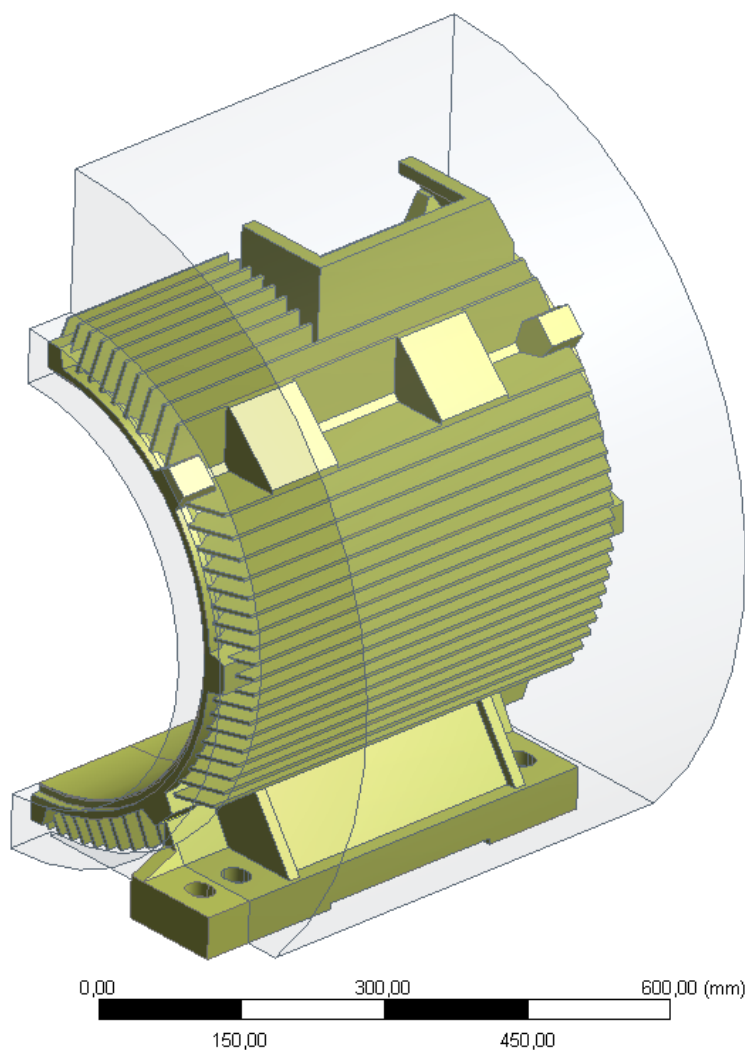
Obr.11 *Tvorba geometrie 2*



Obr.12 *Tvorba geometrie 3*



Obr.13 *Tvorba geometrie 4*



Obr.14 *Finální podoba geometrie modelu*

Konečná podoba geometrického modelu obsahuje dvě tělesa pojmenována jako SOLID a FLUID rozdělená rovinou symetrie.

SOLID je v podstatě dodaná kostra motoru, na kterou navíc byly přidány plochy pro pozdější zadání okrajových podmínek. V programu CFX bude definována jako těleso se všemi vlastnostmi a materiálovými parametry.

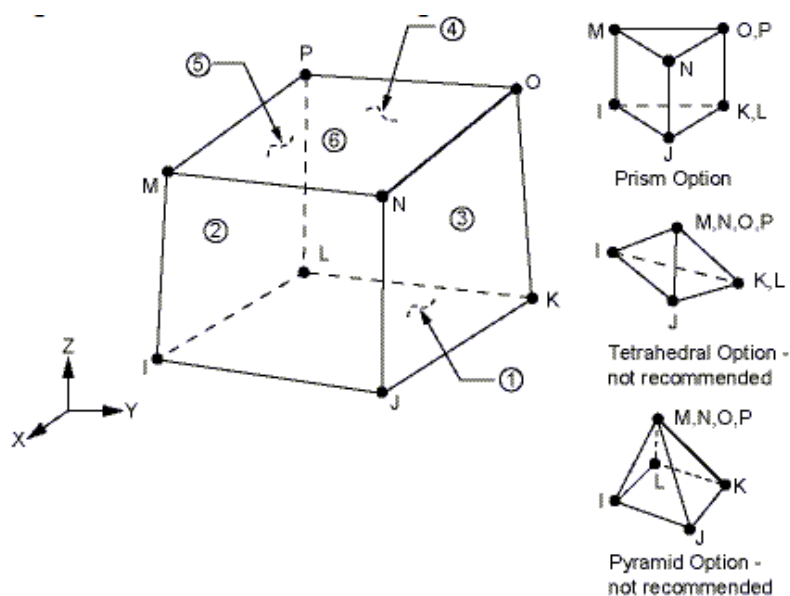
FLUID je kompletně nově vytvořená oblast, ve které bude docházet k proudění a přestupům tepla. Je to válec těsně otisklý kolem kostry motoru s dostatečným prostorem pro proudy. Bude v něm definováno proudící médium a na každou z jeho ploch budou zadávány okrajové podmínky.

3.3 Rozdělení modelu na konečné prvky

Při síťování modelu je vždy prioritou získat síť dostatečně hustou, aby zachytila všechny jevy s dostatečnou přesností (tepelné toky, přestup tepla, víry). U modelu tohoto typu, kdy dochází k přestupu tepla mezi pevným tělesem a prostředím je nejdůležitější mít dostatečně jemnou síť v tzv. inflační vrstvě – oblasti styku pevného tělesa s proudící látkou, protože v té dochází k většině zkoumaných jevů.

Problémem s jemností sítě je najít kompromis mezi její velikostí a dostatečně věrnými výsledky, v případě této práce je tedy využití symetrie úlohy velkou výhodou, která nám umožní jednu půlku modelu vysíťovat mnohem jemněji se stejným počtem elementů, který by mnohem hůře vysíťoval celý model.

Další snahou by mělo vždy být zvolit vhodný typ elementu. Obecně je považováno za lepší použít místo prvků s trojúhelníkovou stěnou tzv. quad-hexahedry (kostky, kvádry).



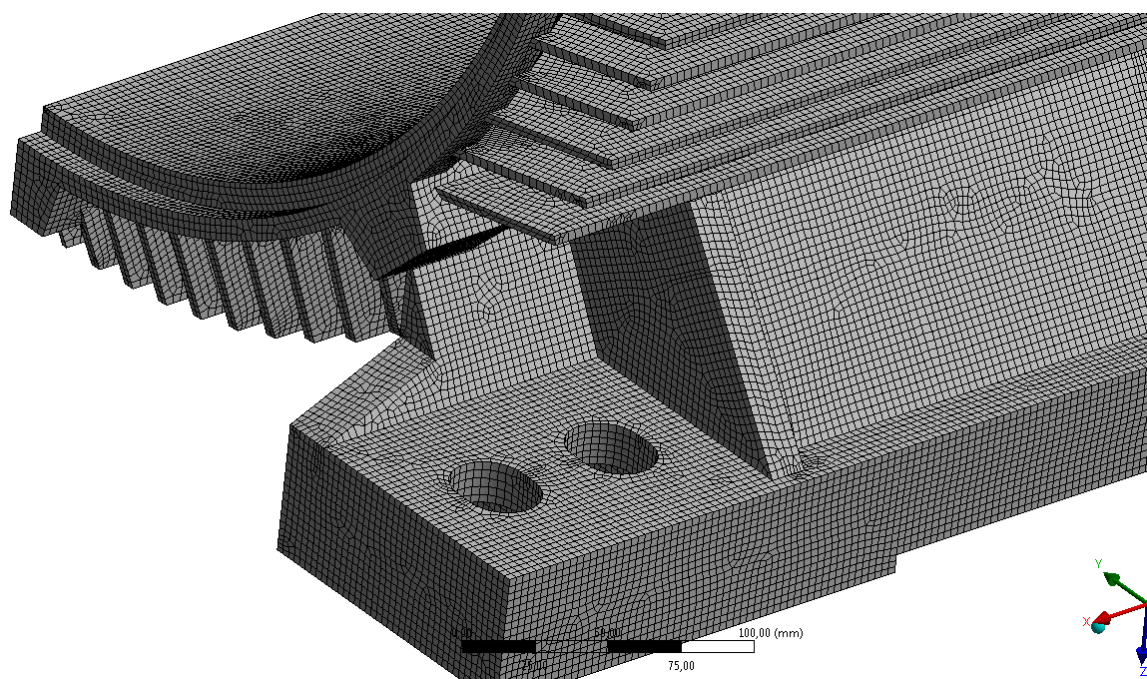
Obr.15 Použitý typ elementu [9]

Pro vytvoření požadované sítě nabízí program ANSYS Workbench škálu funkcí a síťovacích metod, jejichž použití nám pomůže síť nastavit do požadované kvality.

V našem případě bylo využito zejména globální nastavení sítě, velikost elementů (3 mm), inflační vrstva. Navíc byla na SOLID použita metoda síťování Hex Dominant, kde převedla prvky na quad-hexahedry. Tato metoda bohužel nefungovala stejně dobře na FLUIDU, u kterého tento převod vzhledem k složitostem geometrie nebyl možný. Na FLUID byl navíc ještě nastaven tzv. Sizing a velikost elementů zvětšena na 6 mm.



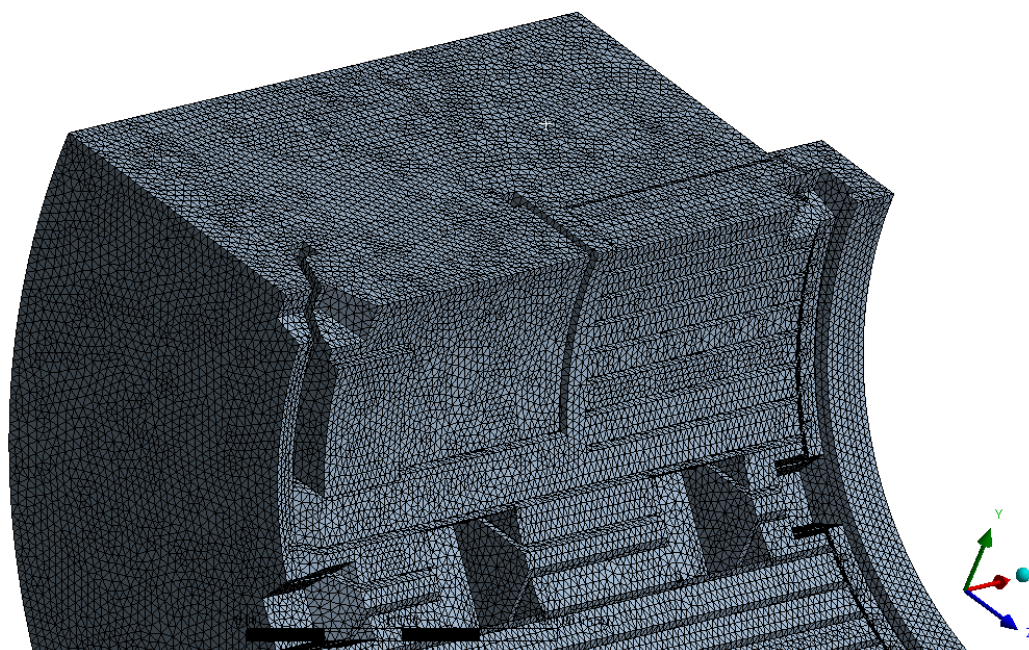
Obr.16 Vysíťovaný SOLID



Obr.17 Vysíťovaný SOLID – detail



Obr.18 *Vysíťovaný FLUID*



Obr.19 *Vysíťovaný FLUID- detail*

Celková velikost vzniklé sítě je 5 320 577 elementů.

3.4 Definování prostředí

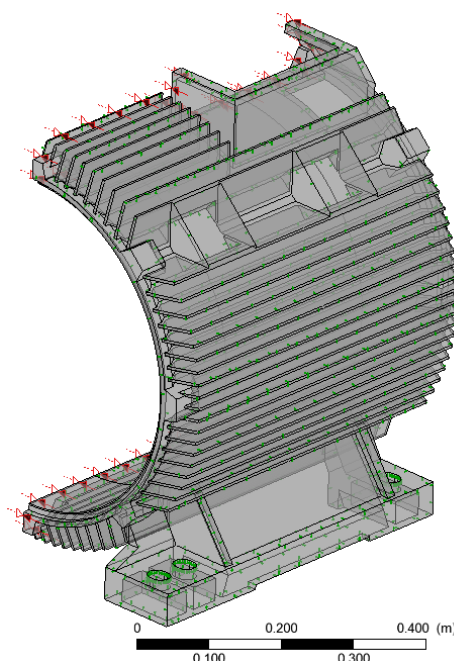
Ve vzniklém modelu figurují dvě prostředí. Kostra motoru jako pevné těleso (SOLID) z šedé litiny a kolem ní válec, ve kterém bude prudit vzduch (FLUID). Jelikož mezi těmito tělesy dochází k interakci a kostra motoru se bude chladit proudícím vzduchem, je další neméně důležitou součástí modelu tzv. Interface, tedy rozhraní (společná hranice) mezi SOLIDEM a FLUIDEM.

3.4.1 Solid

U kostry motoru neboli Solidu byl v první řadě definován materiál. Zde byl vybrán Grey Cast Iron z materiálové knihovny programu CFX. Navíc byly změněny některé materiálové vlastnosti. Dle přání zadavatele:

- Youngův modul pružnosti $E = 110 \text{ GPa}$,
- Poissonovo číslo $\mu = 0,28$,
- Hustota $\rho = 7200 \text{ kg.m}^{-3}$.

Navíc byly u kostry elektromotoru nastaveny parametry pro přestup a vedení tepla. Zde byla v záložce Heat Transfer nastavena možnost Thermal Energy.

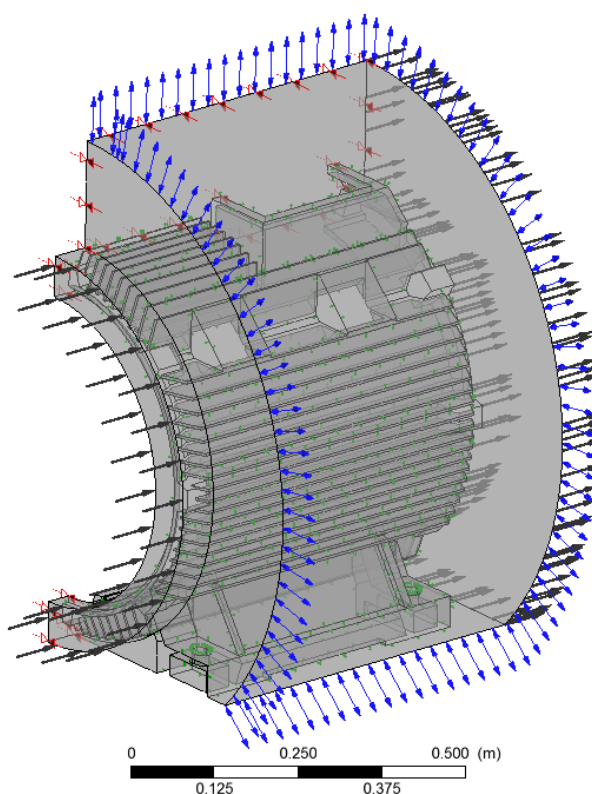


Obr.20 Solid

3.4.2 Fluid

Pro druhou část modelu – Fluid je jako proudící kapalina definován vzduch o teplotě 25°C. Referenční tlak je nastaven na 1 atm a přestup tepla je zde opět nastaven jako Thermal Energy.

Navíc je zde volen turbulentní model – k-Epsilon (více o turbulentních modelech a jejich teorii v kapitole 2 této práce).



Obr.21 Fluid

3.4.3 Interface

Interface obsahuje všechny plochy společné pro Solid i Fluid. Těmito plochami bude v modelu docházet k výměně tepla mezi motorem a vzduchem. Pro tyto plochy není definována žádná další okrajová podmínka.

Typ Interface je nastaven jako Fluid Solid s modelem General Connection. Přestup tepla v modelu byl zajištěn nastavením záložky Heat Transfer na Conservative Interface Flux.

3.5 Zadání okrajových podmínek

Pro získání reálného výpočtového modelu, který bude simulovat proudění a přestup tepla stejně, jako k němu dochází na skutečném motoru, musí být správně zadáno množství okrajových podmínek.

Od zadavatele je znám celkový hmotnostní průtok vzduchu, který do modelu proudí z ventilátoru a množství tepelného toku vzniklého elektrickými a mechanickými ztrátami, které bylo rozpočítáno rovnoměrně na celou kostru motoru.

Při práci v programu CFX je zásada definovat okrajové podmínky na předem vybrané plochy. Tento výběr se nazývá Named Selection a provádí se ještě před samotným zadáváním okrajových podmínek.

3.5.1 Vstup (Inlet)

Inlet je okrajová podmínka definována výhradně na Fluid (obr.25). Závisí na ní množství a směr tekutiny vstupující do modelu.

V tomto případě na motor fouká vzduch z ventilátoru. Zadavatel poskytl přesnou hodnotu množství proudícího vzduchu $\dot{v} = 1,01 \frac{kg}{s}$. Toto množství musí být zmenšeno na polovinu, protože je uvažován poloviční model a tudíž $\dot{v} = 0,505 \frac{kg}{s}$. Tato hodnota lze sama o sobě zadat do programu CFX avšak při tomto zadání proudí všechen vzduch ve směru normály vstupní plochy. To dostatečně přesně nepopisuje skutečnost, při které ventilátor vzduch nefouká pouze přímo v jednom směru kolem motoru, ale část vzduchu odfoukne od motoru pryč. Samotné proudění je pak také daleko více turbulentní.

Bylo rozhodnuto o jiném druhu zadání vstupního toku a to pomocí rychlostí. Zadaná hodnota hmotnostního průtoku je vlastně výsledkem rovnice:

$$\dot{v} = S \cdot \rho \cdot v \left[\frac{kg}{s} \right],$$

Rov.16 Rovnice hmotnostního průtoku

kde: $S = 5,6327e^{-2} m^2$ - vstupní plocha,
 $\rho = 1,24 kg/m^3$ - hustota,
 $v = ? m/s$ - vstupní rychlost.

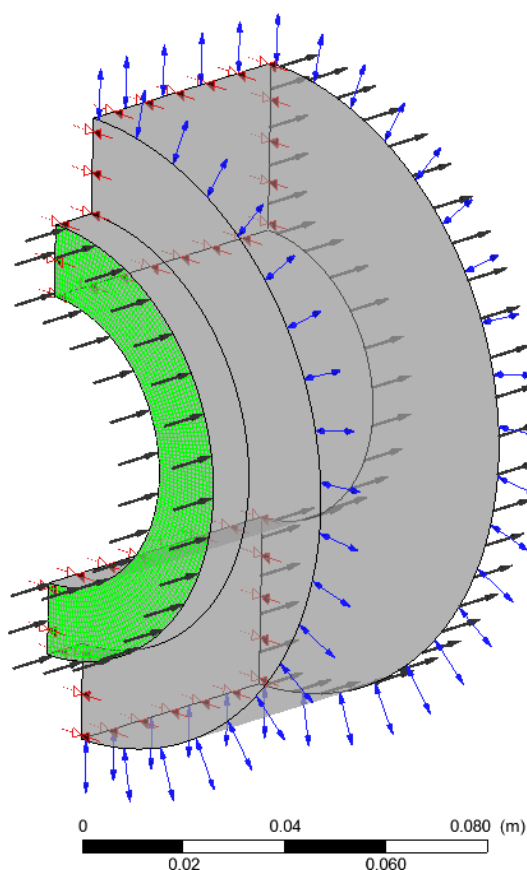
Pomocí rovnice 16 vyjádříme rovnici pro vstupní rychlost a tu vypočteme:

$$v = \frac{\dot{v}}{\rho \cdot S} = \frac{0,505}{1,24 \cdot 5,6327e^{-2}} = 7,23 \frac{m}{s}$$

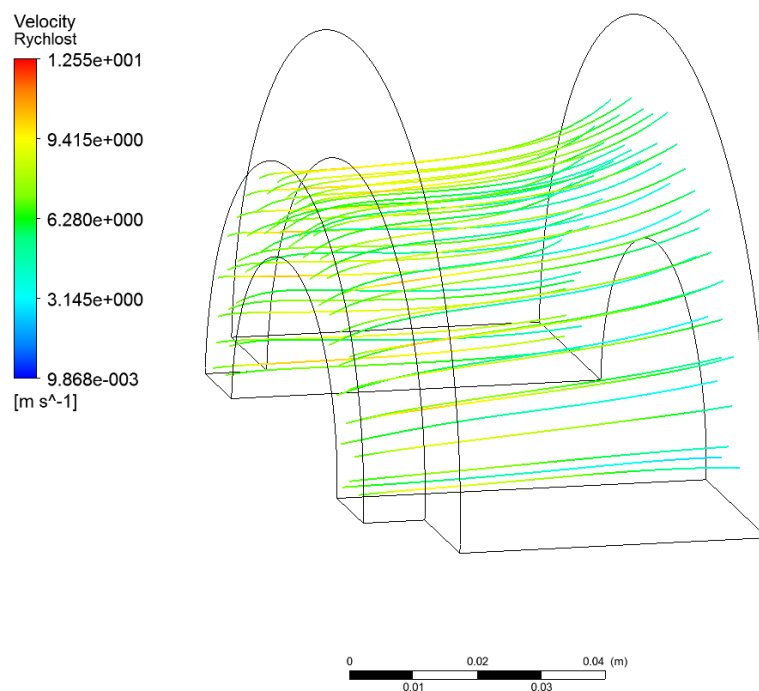
Rov.17 Výpočet vstupní rychlosti

Tím byl převeden hmotnostní průtok na rychlost proudění. Tato je ale stále ještě kolmá k normále vstupní plochy. Zbývá zjistit, jak tuto rychlost rozdělit na směry pro dosažení co nejvěrnějšího zachycení reality. Bylo rozhodnuto o rozdělení rychlosti na 3 složky podle cylindrického souřadného systému.

Pro rychlejší testování navržených kombinací byl vytvořen zmenšený model (obr.22) s geometrií podobnou hlavnímu modelu, na kterém výpočty proběhnou za zlomek času potřebného k celému výpočtu.



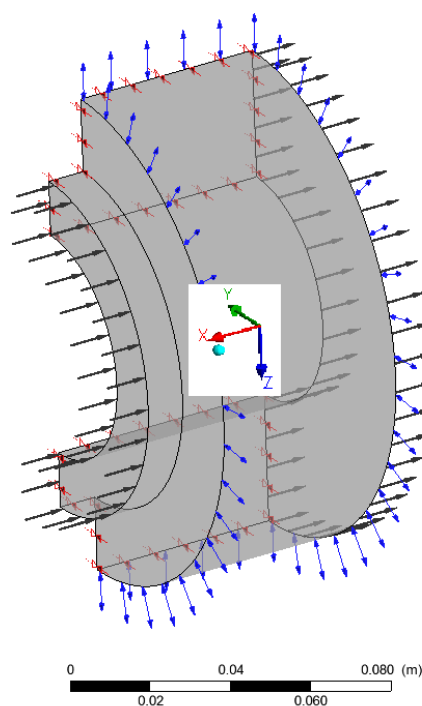
Obr.22 Testovací model



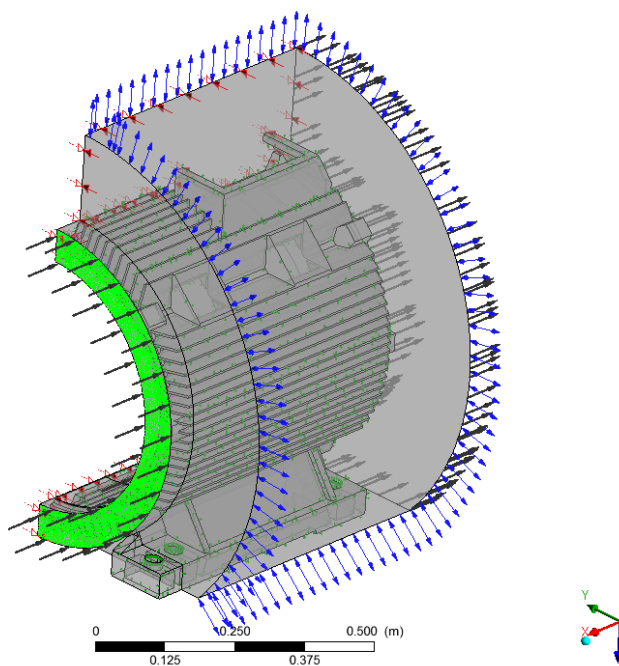
Obr.23 Proudnice v testovacím modelu

Na obr.23 je vidět průběh proudících čar pro finální nastavení vstupní rychlosti. Ta je definována 3-mi složkami v cylindrickém souřadném systému. Jako rotační byla zvolena osa x. **Axiální složka $v_{ax} = -6$ m/s , radiální složka $v_{rad} = 4$ m/s a théta složka $v_{th} = 1$ m/s.** Dohromady dávají všechny tři složky výslednou vypočtenou rychlost $v = 7,23$ m/s.

Turbulence u vstupu byla nastavena **high** (Intenzita= 10%).



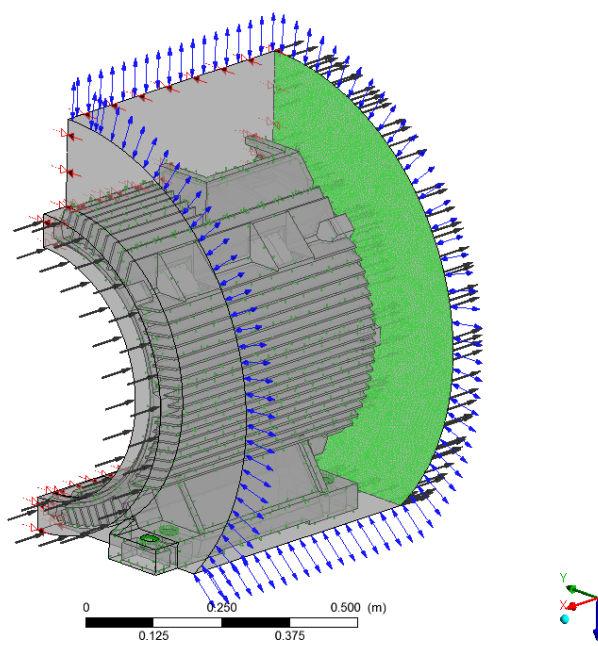
Obr.24 Souřadnicový systém modelu



Obr.25 Vstupní plocha

3.5.2 Výstup (Outlet)

Outlet je okrajová podmínka zadávaná pouze na Fluid. Je definována na plochu, kterou z modelu odtéká tekutina. V tomto modelu je definována jako průměrný statický tlak 0 Pa.

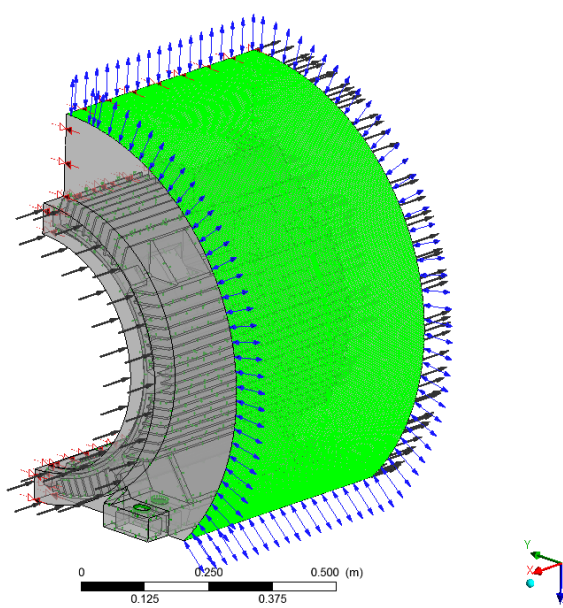


Obr.26 Výstupní plocha

3.5.3 Opening

Opening je okrajová podmínka zadávaná pouze na Fluid. Do tohoto modelu byla zařazena dodatečně a nahradila na dané ploše okrajovou podmínku Wall. Opening umožňuje opustit tekutinu model a případně i tekutinu do modelu zpátky nasát. Při proudění kolem motoru tak mohou některé zavířené proudnice opustit model i jinde než na výstupní ploše.

U této okrajové podmínky byla provedena nastavení Opening tlaku 0 Pa a Opening teploty 26 °C. Turbulence byla nastavena medium (Intenzita 5%).

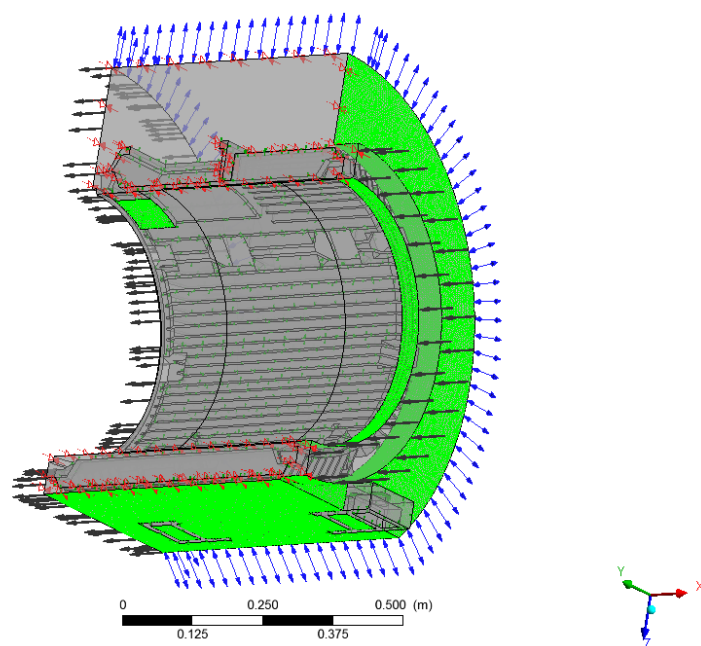


Obr.27 Opening

3.5.4 Wall

Wall je okrajová podmínka zadávaná pouze na Fluid. Definuje plochu jako pevnou nepropustnou stěnu. V modelu je tato podmínka použita pro několik ploch.

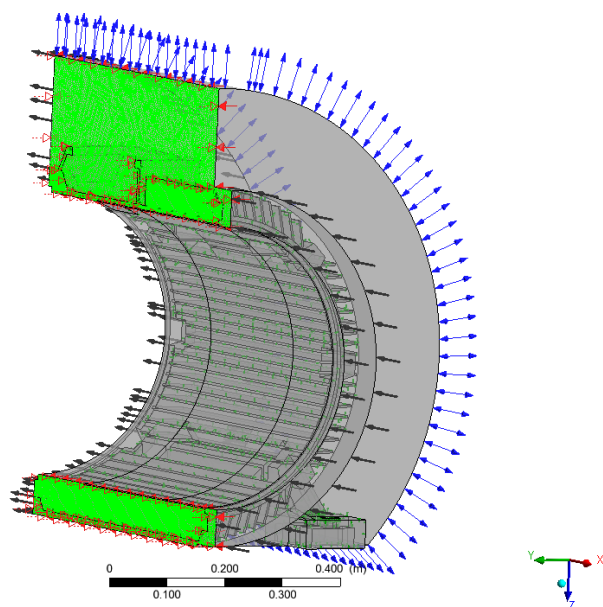
U této podmínky nebyly měněny žádné nastavení, teplotní tok zde je vypnut a stěna je nastavena jako adiabatická.



Obr.27 Wall

3.5.5 Symmetry

Symmetry je okrajová podmínka zadávaná jak na Fluid, tak na Solid. Definuje plochy vzniklé rozdělením modelu na polovinu pomocí roviny symetrie. Není třeba provádět žádná nastavení a celý model můžeme později podle těchto ploch zrcadlit a zobrazit výsledky na celku.

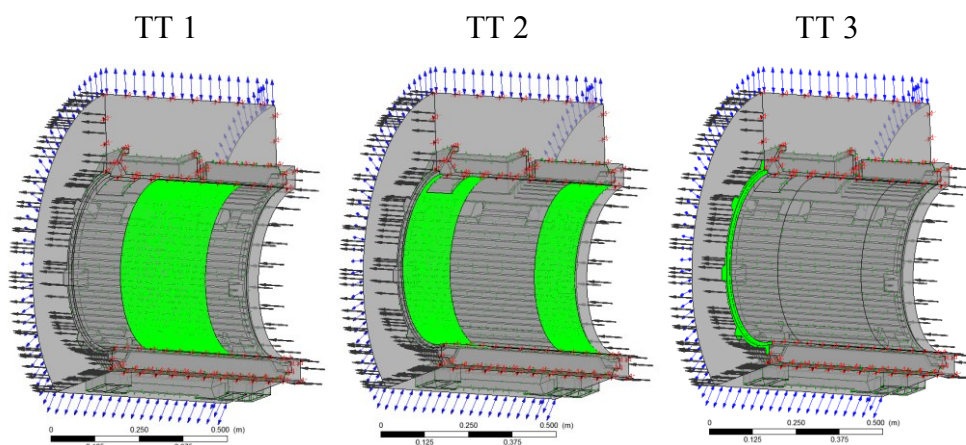


Obr.28 Symmetry

3.5.6 Teplotní tok

Teplotní tok je okrajová podmínka definovaná pouze na Solid. Jedná se o teplo vzniklé během provozu motoru jako mechanické a elektrické ztráty. V programu CFX je nastavena jako okrajová podmínka Wall, ve které je navíc definován Heat Transfer a to jako Heat Flux.

Podle zprávy [8], která se zabývala experimentálním zjištěním teplot motoru za provozu a následně nastavením teplotních toků jsou vytvořeny 3 oblasti a na každou zvlášť je definována jiná hodnota teplotního toku tak, aby model co nejvěrněji odrážel skutečnost.



Obr.29 Teplotní toky

Hodnoty teplotních toků jsou zadána v tabulce 1:

Místo	Teplotní tok [W/m^2]
TT 1	2193
TT 2	1008,5
TT 3	2848,5

Tab.1 Hodnoty teplotních toků

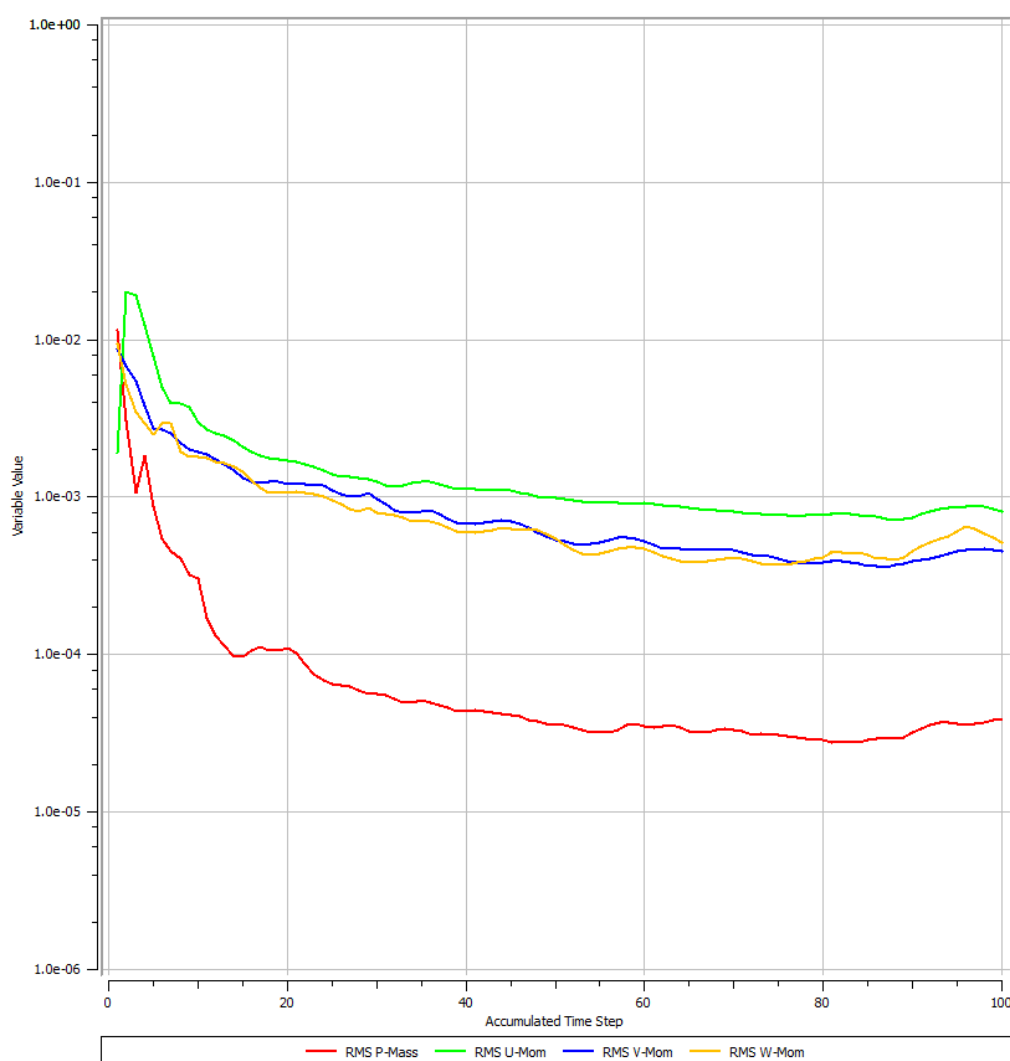
4 Výpočet a výsledky

4.1 Nastavení a průběh výpočtu

Pro výpočet bylo nastaveno konvergenční kritérium $1e^{-4}$ a maximální počet iterací 100. Primární kontrola konvergence byla prováděna na RMS residuálech. Ty se mohou během výpočtu monitorovat a sledovat zda výpočet konverguje k řešení úlohy.

Výpočet proběhl a bylo vypočítáno plných 100 iterací a cílové residuály nedosáhly požadovanou hodnotu $1e^{-4}$. Ta se ukázala jako příliš přísné kritérium a její dosažení by značně prodloužilo výpočet se zanedbatelným vlivem na výsledky. Během výpočtu cílové residuály pohodlně překročily hodnotu $1e^{-3}$ a měly tendenci s každým dalším krokem klesat.

Výpočet, který proběhl úspěšně, trval 4 hodiny a 37 minut.



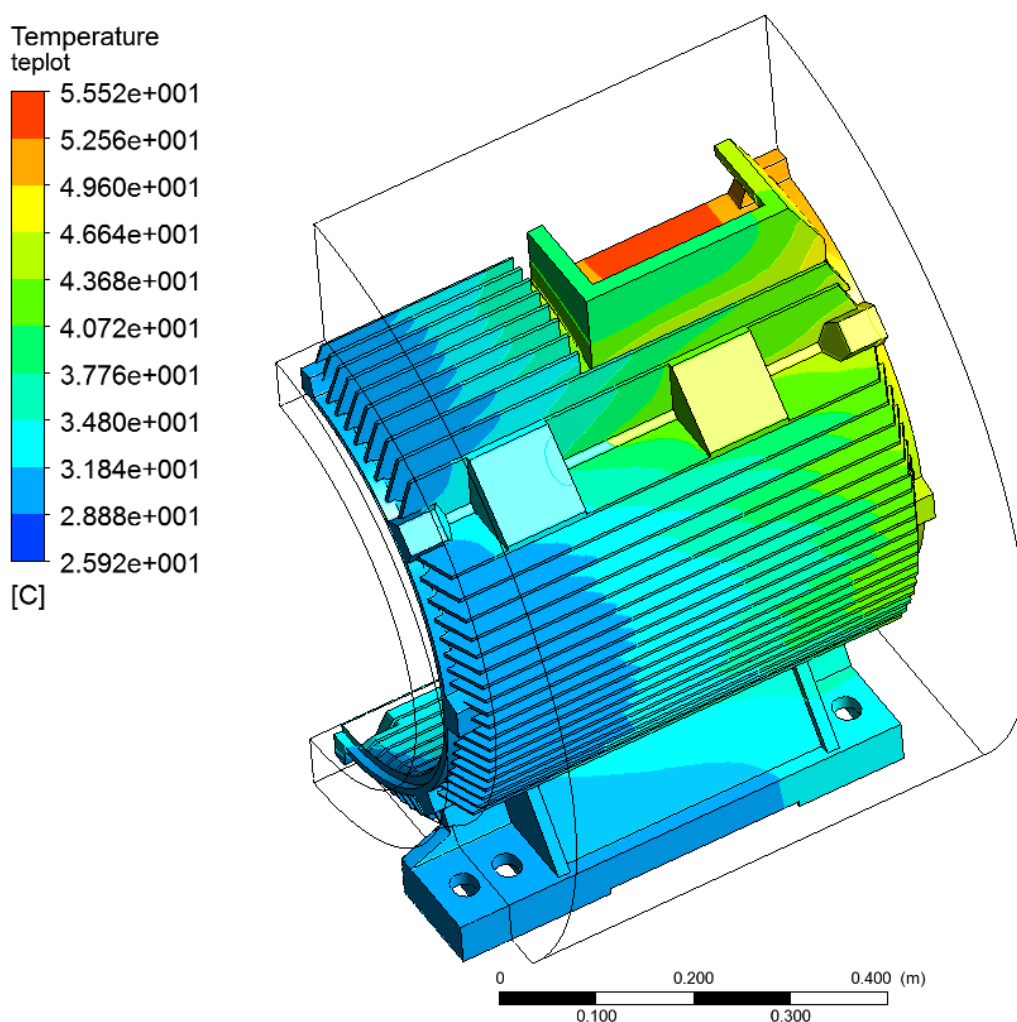
Obr.30 Průběh RMS residuálů

4.2 Vyhodnocení výsledků

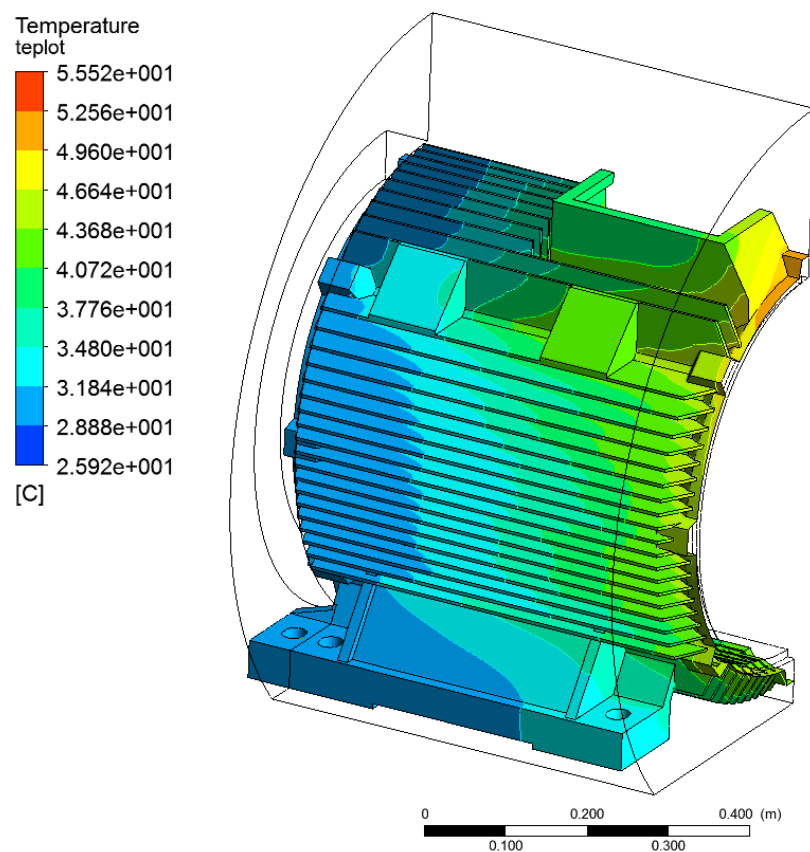
Vyhodnocení výsledků v programu CFX se provádí v modulu CFD-Post. Zde je celá řada možností jakým způsobem výsledky zobrazit.

V této práci je primárním úkolem zjistit rozložení teplot na povrchu kostry elektromotoru a také jak kolem kostry proudí vzduch a jak dobře odvádí vzniklé teplo pryč.

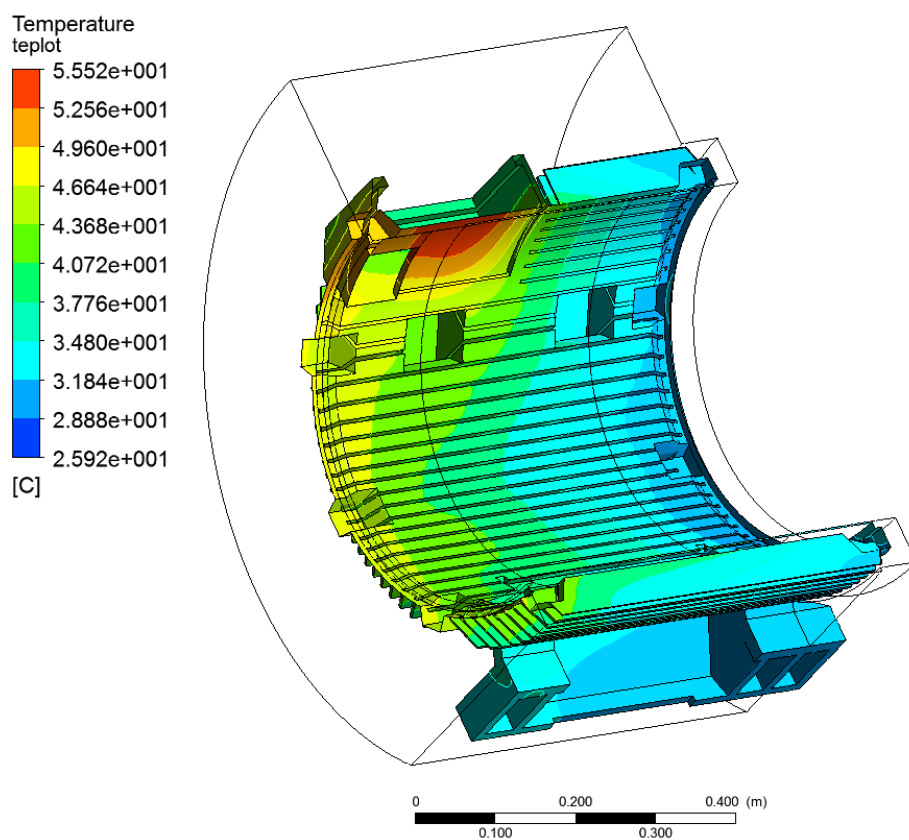
4.2.1 Rozložení teplot na kostře elektromotoru



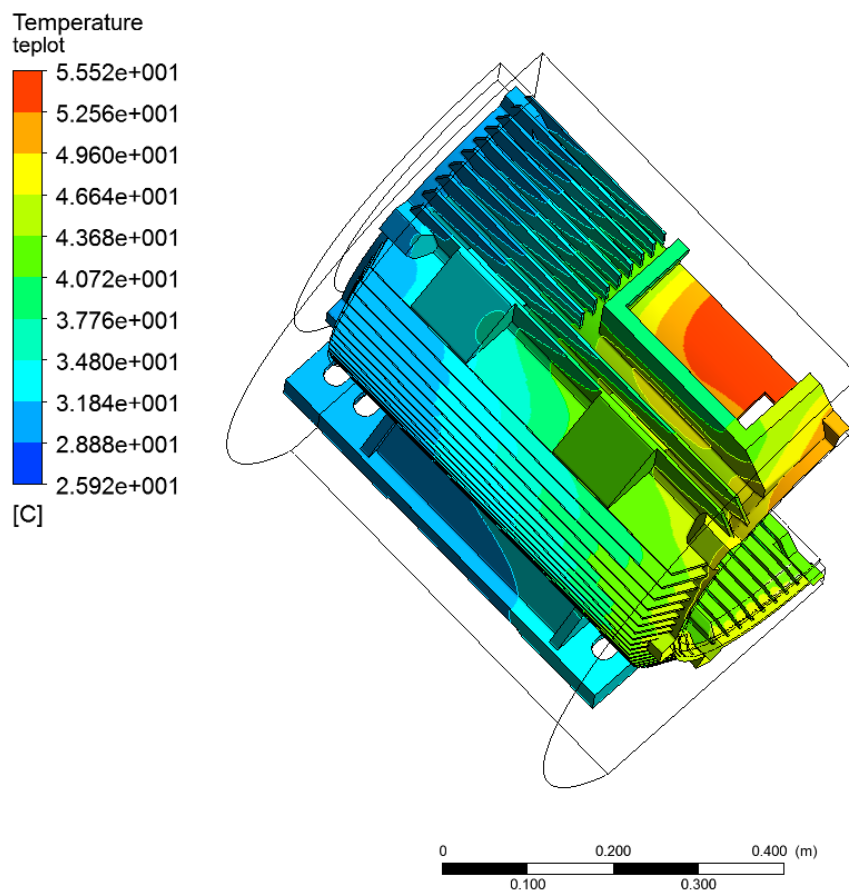
Obr.31 Rozložení teplot na vnější kostře elektromotoru



Obr.32 Rozložení teplot na vnější kostře elektromotoru – pohled zezadu



Obr.33 Rozložení teplot na vnitřní kostře elektromotoru – pohled zevnitř



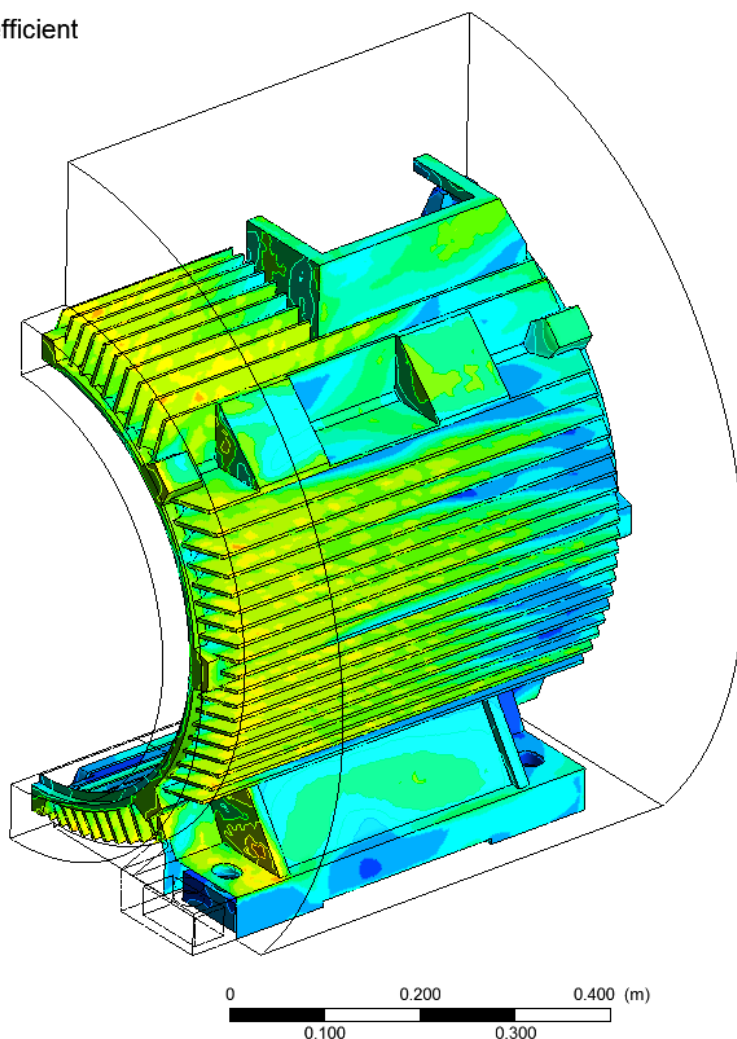
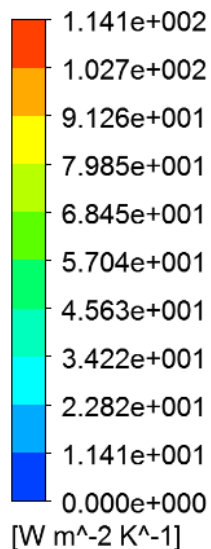
Obr.34 Rozložení teplot - pohled na místo s nejvyšší teplotou – pohled shora

Na obr. 31-34 je vykresleno rozložení teplot na kostře elektromotoru. Nejnížší teplota je 25,92 °C a vyskytuje se na stěně nejbližší ventilátoru – přímo u zdroje chlazení. Nejvyšší teplota je 55,52 °C a ta se vyskytuje v místě svorkovnice, která je uzavřená a vzduch ji tak nemá možnost chladit. Po délce motoru je pak vidět nárůst teploty směrem od ventilátoru.

Tyto výsledky se zdají být naprosto logické a správné, podobné rozložení teplot bylo zjištěno i během experimentálního měření prováděného při vypracování zprávy o numerické optimalizaci tvaru kostry elektromotoru [8].

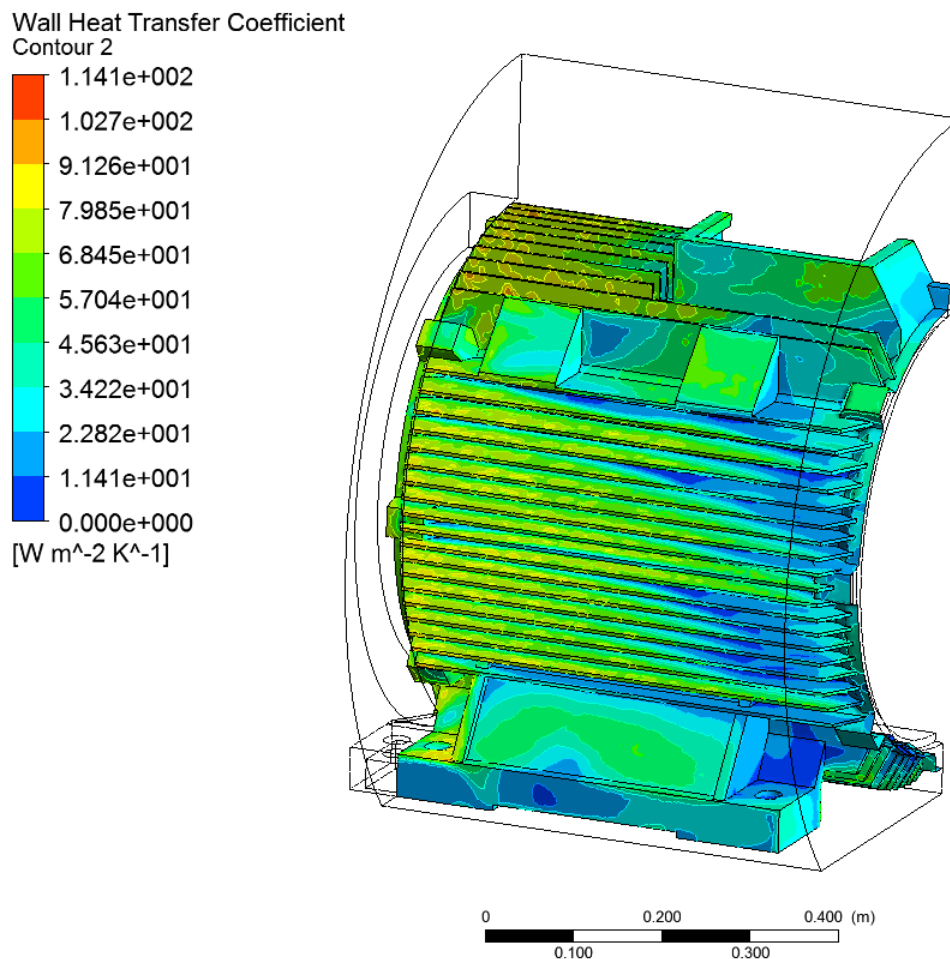
4.2.2 Součinitel přestupu tepla

Wall Heat Transfer Coefficient
Contour 2



Obr.35 Součinitel přestupu tepla – vnější kostra

Při pohledu na rozložení součinitele přestupu tepla (obr.35 a 36) lze získat poměrně jasnou představu o tom, jak se některé části kostry motoru dokáží chladit účinněji než jiné. Z rozložení je patrné, že nejlépe předává teplo vzduchu přední část kostry blízko ventilátoru a čím je místo od zdroje vzduchu dál, tím hůř na tom je. Úplně nejhůře na tom jsou místa, kde je proudění vzduchu zabráněno úplně (např. uzavřená svorkovnice).

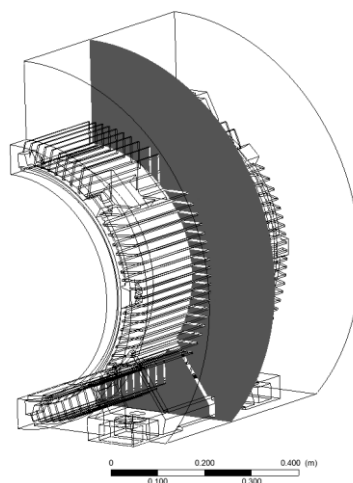


Obr.36 Součinitel přestupu tepla – vnější kostra

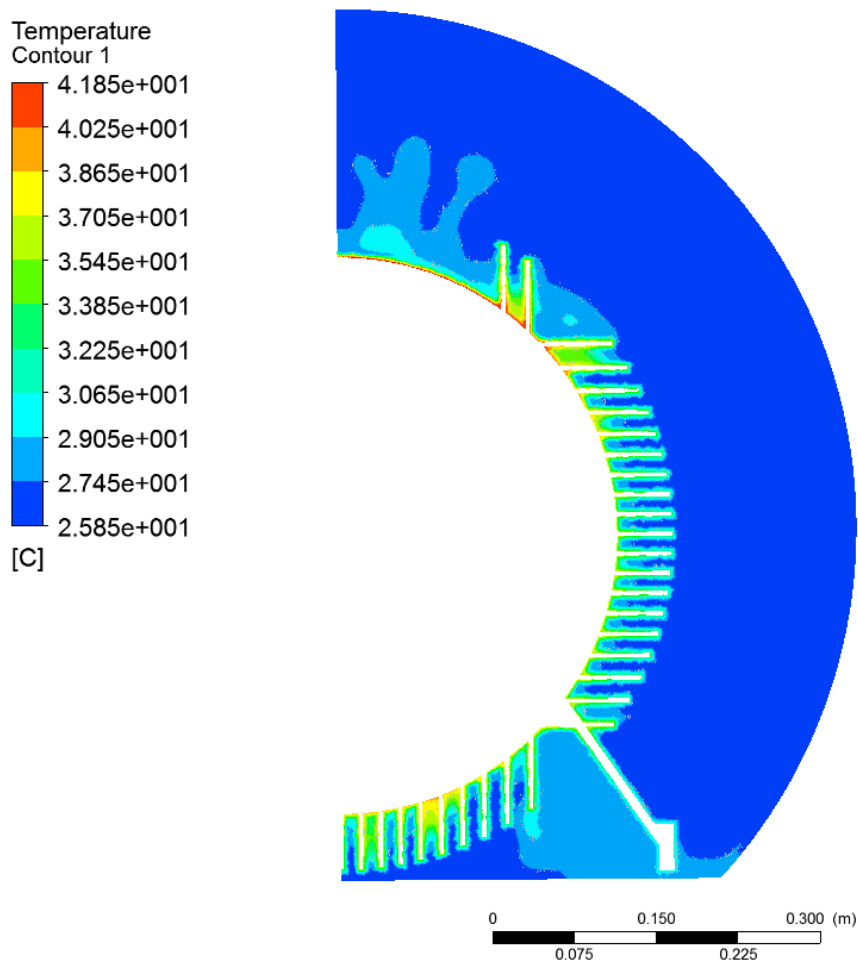
4.2.3 Ohřívání proudícího vzduchu

Dalším výsledkem, který byl kontrolován, je teplota vzduchu kolem kostry motoru (obr.38). V několika předchozích výpočtech, kdy byly špatně nastaveny okrajové podmínky a nedocházelo ke správnému přestupu tepla z motoru na vzduch bylo právě zobrazení teploty vzduchu kolem motoru jasným a průkazným ukazatelem chyby v modelu.

Pro zobrazení teploty vzduchu kolem motoru byla vytvořena speciální rovina umístěná v polovině délky kostry, viz obr.37.



Obr.37 *Rovina pro zobrazení výsledků*



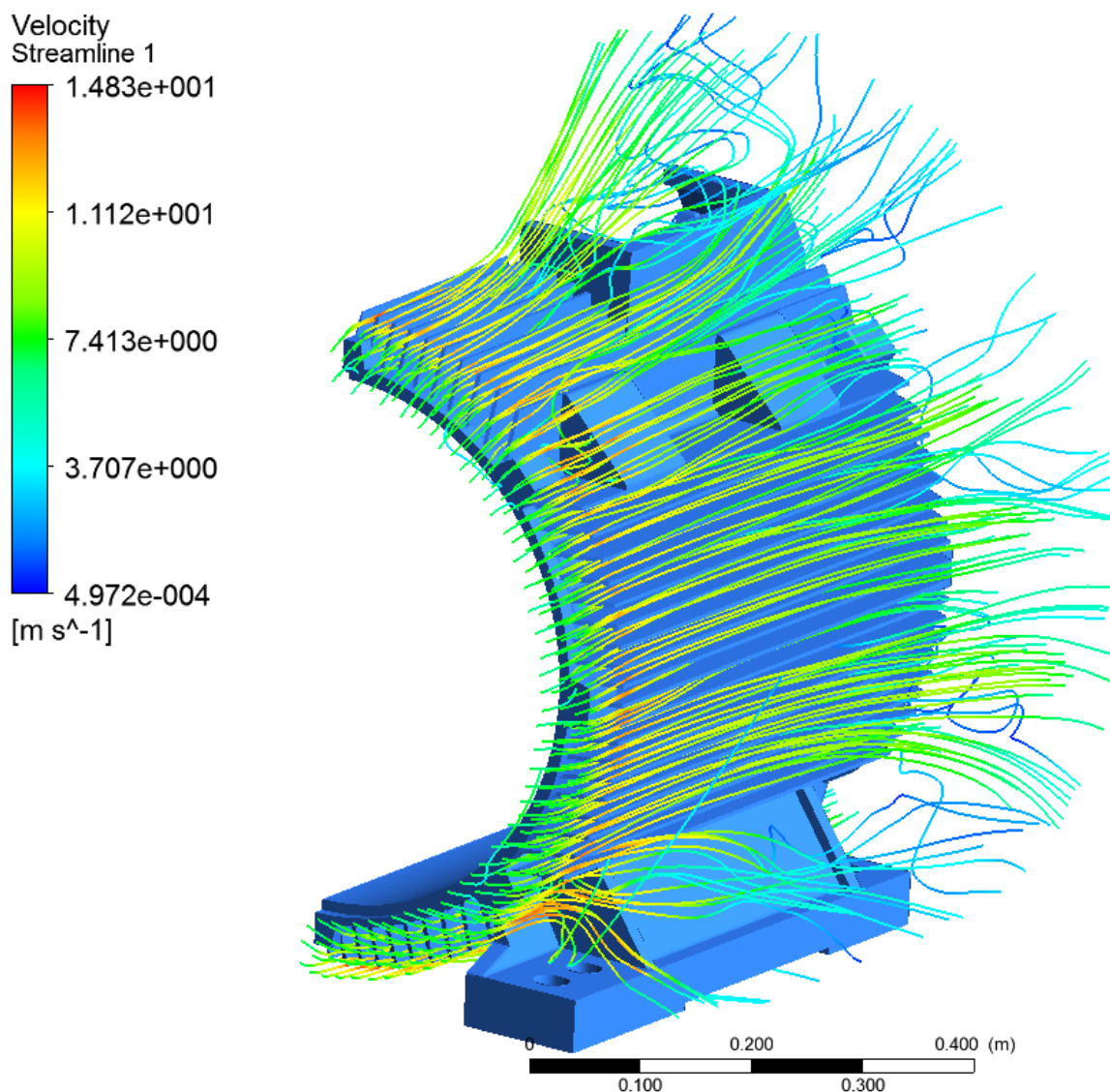
Obr.38 *Teplota proudícího vzduchu*

Z výsledku je jasné patrné, že vzduch je v blízkosti kostry motoru teplejší a tudíž dochází k přestupu tepla mezi motorem a vzduchem.

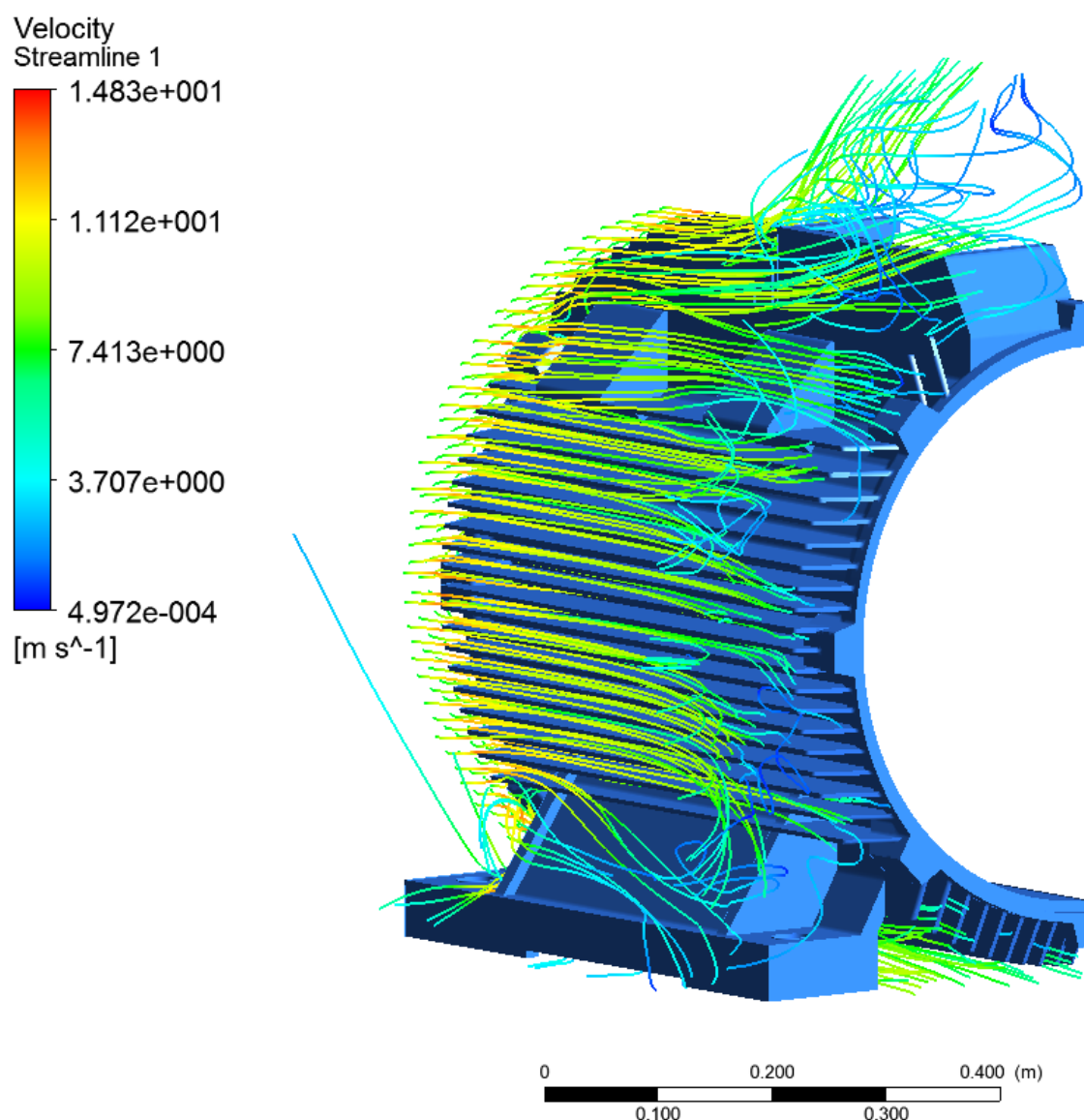
4.2.4 Proudění vzduchu

U proudění byl sledován směr proudnic a rychlost, kterou vzduch proudí okolo kostry elektromotoru. Pro správné chlazení je žádoucí, aby v těsné blízkosti kolem kostry motoru proudilo v co nejvyšší možné rychlosti velké množství vzduchu.

Dobrou možností jak posoudit proudění kolem motoru je zobrazení proudnic (obr.39 a 40). Tyto čáry vyjadřují trajektorii částice vzduchu od jejího vstupu do modelu až k jejímu výstupu. Poskytují ty nejdůležitější informace o proudění, jeho rychlostech a místech, kde dochází k zavíření.

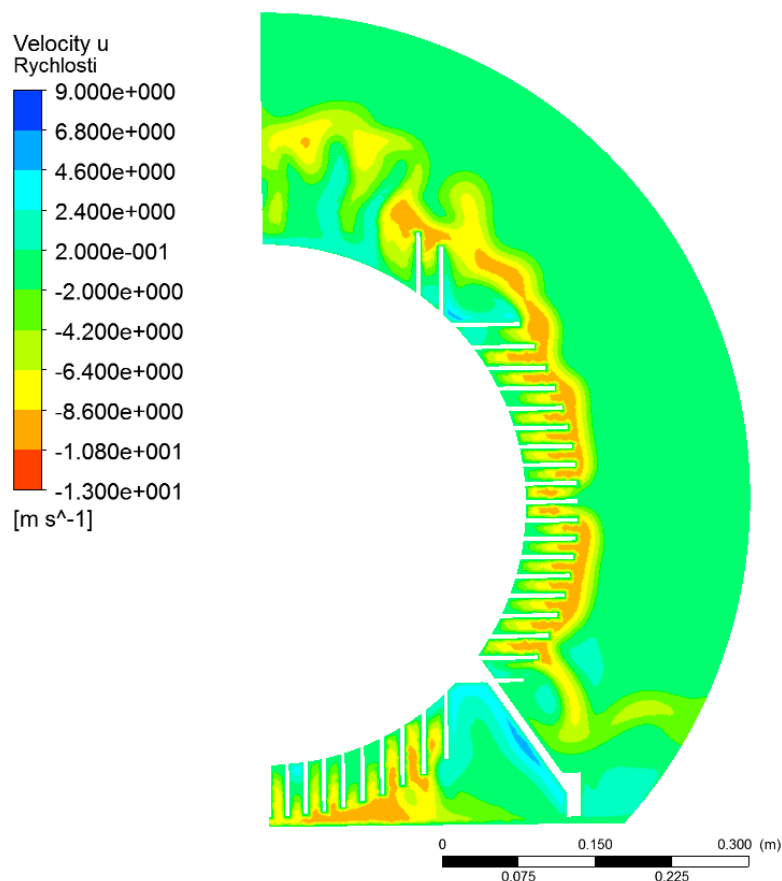


Obr.39 Zobrazení rychlosti a trajektorie proudnic



Obr.40 Zobrazení rychlosti a trajektorie proudnic

Při sledování proudění byla také na vykreslovací rovině (obr. 37) zobrazena rychlost proudícího vzduchu (obr. 41). Díky tomu, že osa x je u modelu nastavena jako u obr.24, je nejvyšší dosažená rychlost proudění v záporné hodnotě.



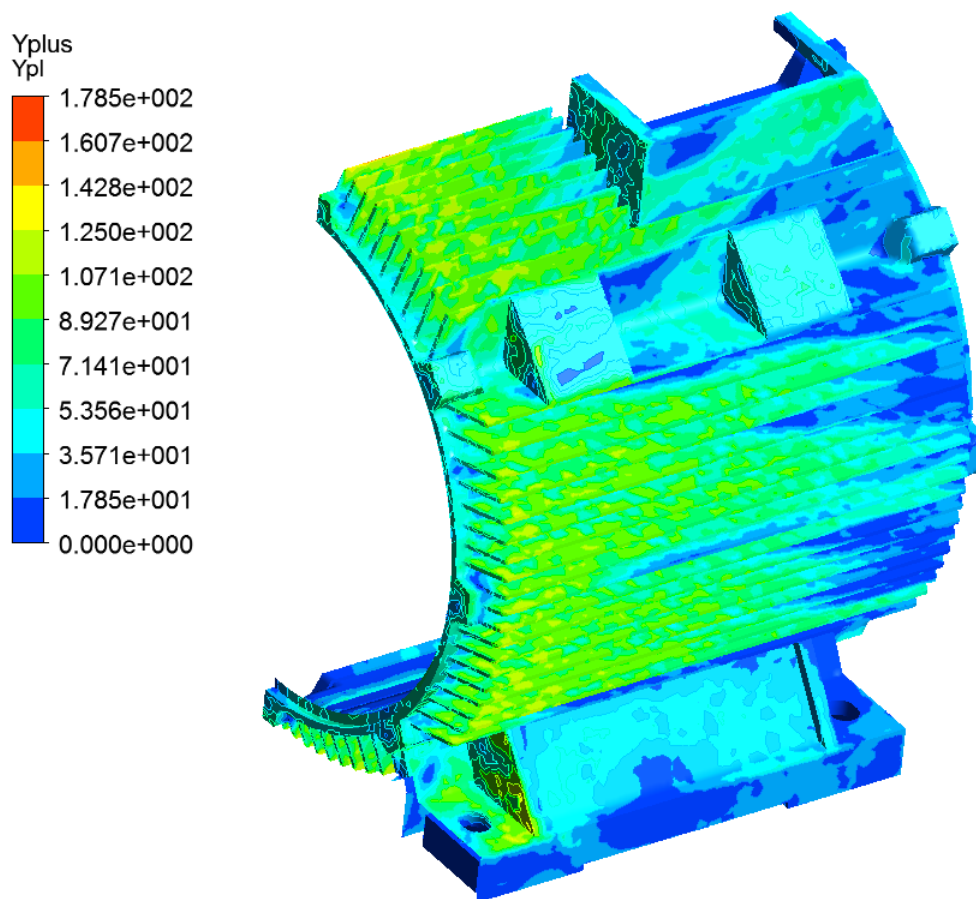
Obr.41 Rychlost proudícího vzduchu

4.2.5 Funkce Yplus

Funkce Yplus slouží jako nástroj k ověření a zkontrolování kvality modelu, konkrétně sítě. Vyjadřuje jak dobře je v modelu vysítována inflační vrstva, tedy oblast Fluidu v těsné blízkosti Solidu. V této vrstvě dochází k nejdůležitějším sledovaným jevům a její kvalitní vysítování je jedním z hlavních předpokladů správného řešení.

V literatuře se uvádí ohledně této funkce spousta rozporuplných informací. Ty nejpřísnější zdroje uvádí jako přípustnou maximální hodnotu funkce Yplus v desítkách, většina zdrojů však připouští hodnoty vyšší a to až do čísla 500.

Na obr.42 jsou zobrazeny hodnoty funkce Yplus. Na většině důležitých míst v modelu se pohybují okolo čísla 100 nebo níže, v maximu dosahují až čísla 178. Tyto hodnoty jsou vzhledem ke složité geometrii přípustné, lepších hodnot lze dosáhnout zjemněním sítě. To by však sebou neslo další nároky na již tak dost vytíženou výpočetní techniku.



Obr.42 Hodnoty funkce *Yplus*

4.3 Vyhodnocení výsledků

Při analýze výsledků se model choval podle všech původních fyzikálních předpokladů. Nevyskytuje se v něm žádná očividná chyba nebo místo, kde by se model nechoval korektně. Model je tedy považován za dobře nastavený a výsledky za správné.

Nejvyšší teplota v modelu je 55 °C a ta se vyskytuje v místě svorkovnice (obr.34). Takto vysoká teplota vznikla v důsledku toho, že svorkovnice je uzavřená a není možné ji přímo chladit vzduchem. Jedinou možností jak snížit teplotu i v tomto místě pomocí ventilátoru je lepší odvod tepla z celé kostry pomocí ploch na povrchu, které chladit lze. Samotné rozložení teplot na modelu je také předpokládáné – teplota se zvyšuje směrem od ventilátoru a na konci mají některá žebra teplotu vyšší i o 20 °C oproti žebřům přímo u zdroje chlazení. To jak která část motoru odvádí teplo nejlépe dokumentuje vykreslení součinitele přestupu tepla (obr.35).

Pro proudící vzduch platí, že má dobrou tendenci držet se v co největší míře kolem kostry a mezi žebry, avšak vlivem turbulence a geometrických překážek na modelu postupně dochází k zavírání v některých místech a opuštění ideální trajektorie na konci modelu (obr.40). Vzduch přijímá z kostry teplo přesně podle nastaveného modelu přestupu tepla a ohřívá se až na teplotu 42 °C. Nejvyšší rychlosti dosahuje vzduch u vstupu do modelu při překonání náběžného kuželu a to 14 m/s.

5 Optimalizace kostry elektromotoru

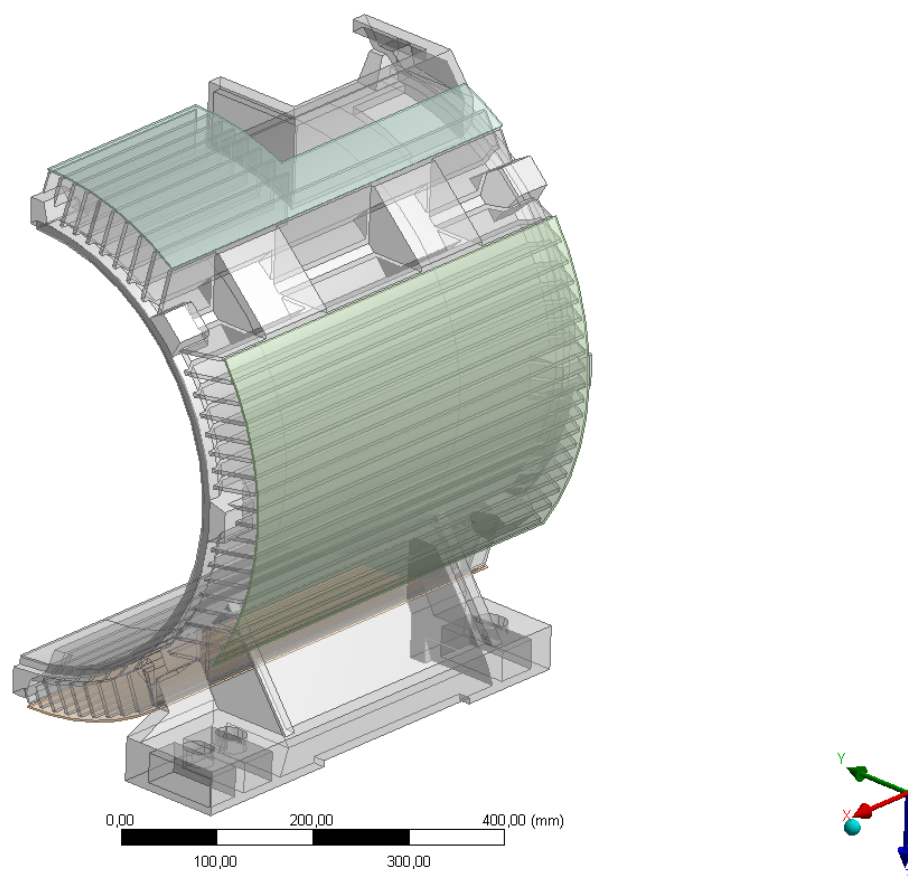
Na základě dosažených výsledků lze uvažovat o způsobu, jakým dojde ke snížení teplot na povrchu kostry elektromotoru.

Při bližším prozkoumání jsou největší nedostatky na chlazení kostry odhaleny v její zadní části. To je způsobeno tím, že proud vzduchu, který kolem kostry proudí v zadní části kostry již není tak intenzivní.

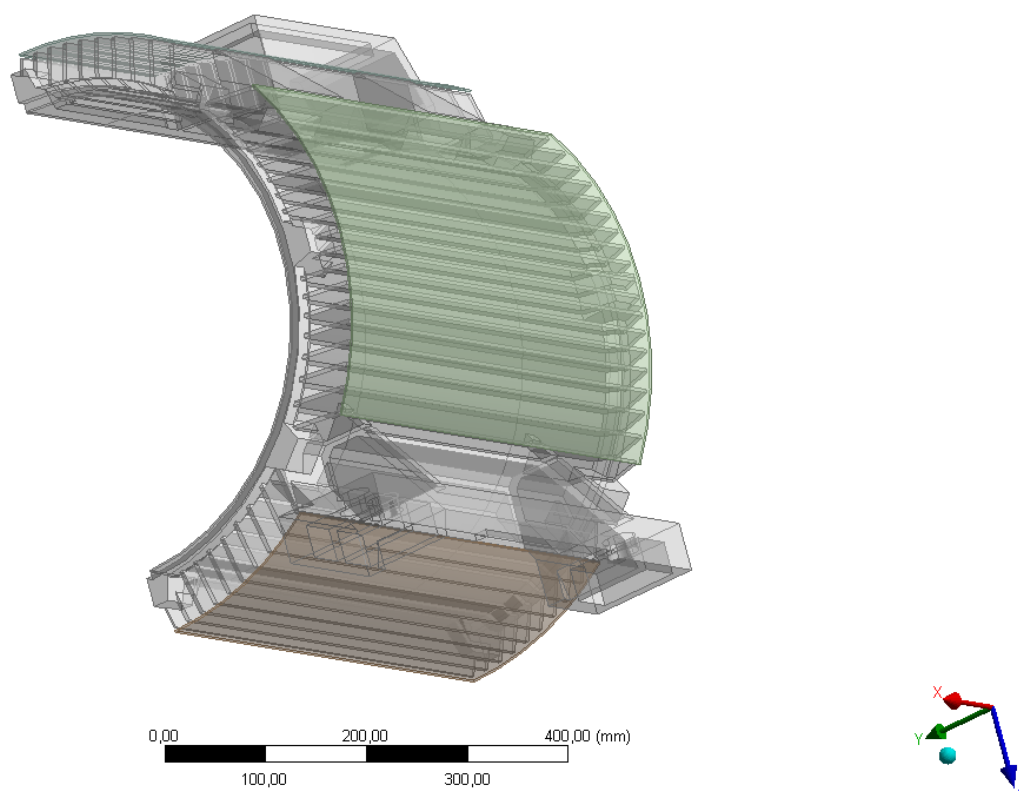
Pro to, aby vzduch zůstal po celou svou dráhu mezi žebry kostry motoru bylo rozhodnuto o zakrytování elektromotoru. Tím by se měl posílit chladicí efekt a odvod tepla především v zadní části kostry motoru.

5.1 Úprava geometrie modelu

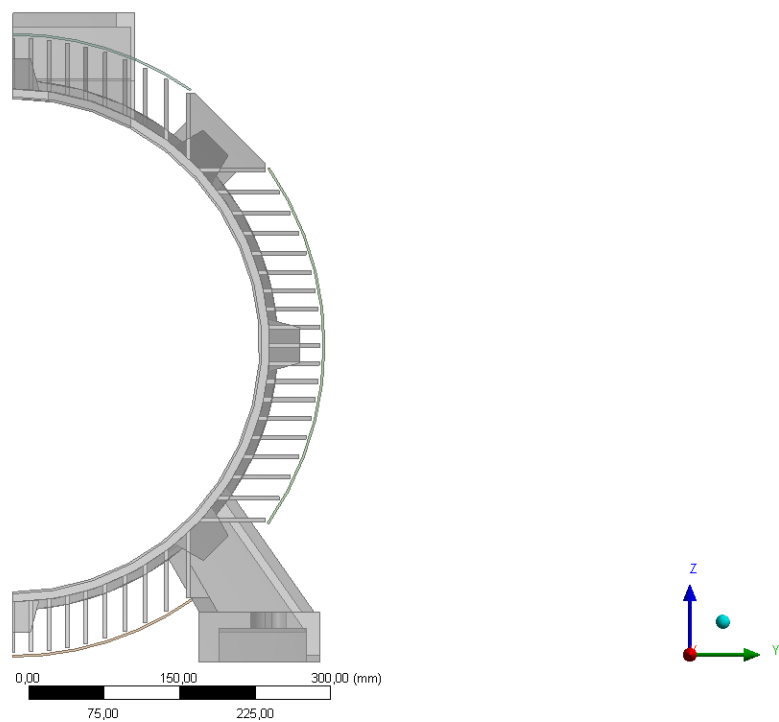
Na zadaný model kostry elektromotoru byly vytvořeny tři kryty sloužící k zadržení vzduchu mezi žebry elektromotoru (obr. 43 – 45). Takto by v modelu vznikly navíc další části. Vzhledem k tomu že tyto kryty slouží pouze pro udržení vzduchu co nejtěsněji kolem kostry motoru, bylo rozhodnuto o tom je nemodelovat jako samostatnou část. Místo toho bylo přistoupeno k odečtení těchto částí pomocí funkce Boolean – Subtract od Fluidu (obr.46). Na vzniklých plochách pak tyto kryty zadáme pomocí okrajových podmínek. Tímto krokem zajistíme co největší podobnost obou modelů, zejména co se kvality a hustoty sítě týče.



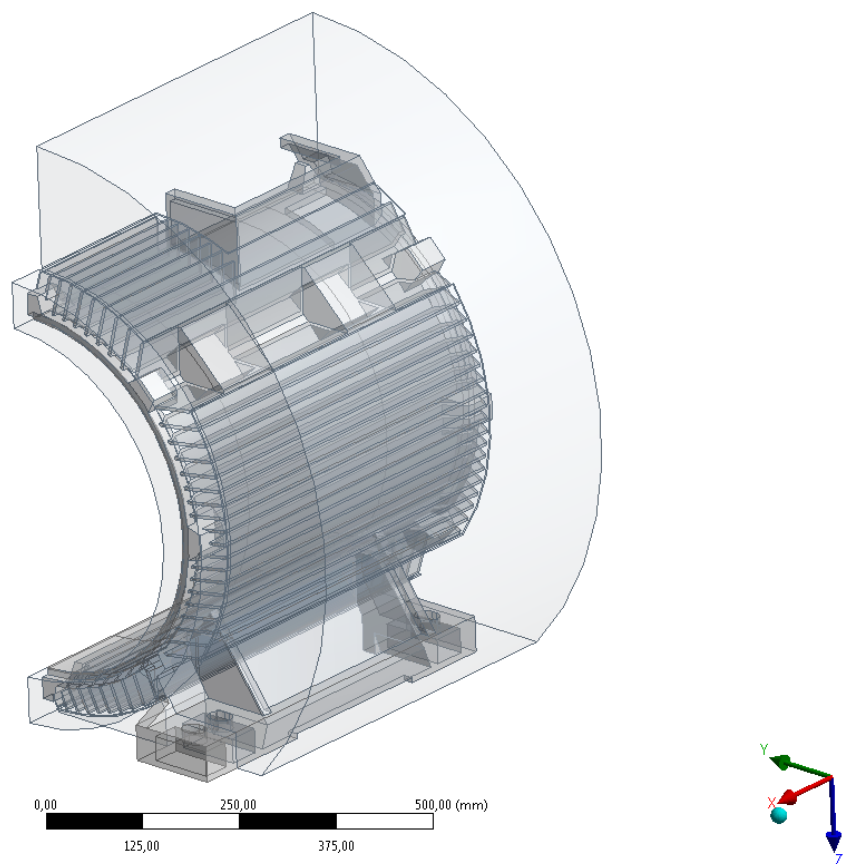
Obr.43 Optimalizovaná kostra elektromotoru - pohled shora



Obr.44 Optimalizovaná kostra elektromotoru - pohled zespoda



Obr.45 Optimalizovaná kostra elektromotoru - pohled zepředu



Obr.46 Optimalizovaná kostra elektromotoru – finální geometrie

5.2 Další nastavení modelu

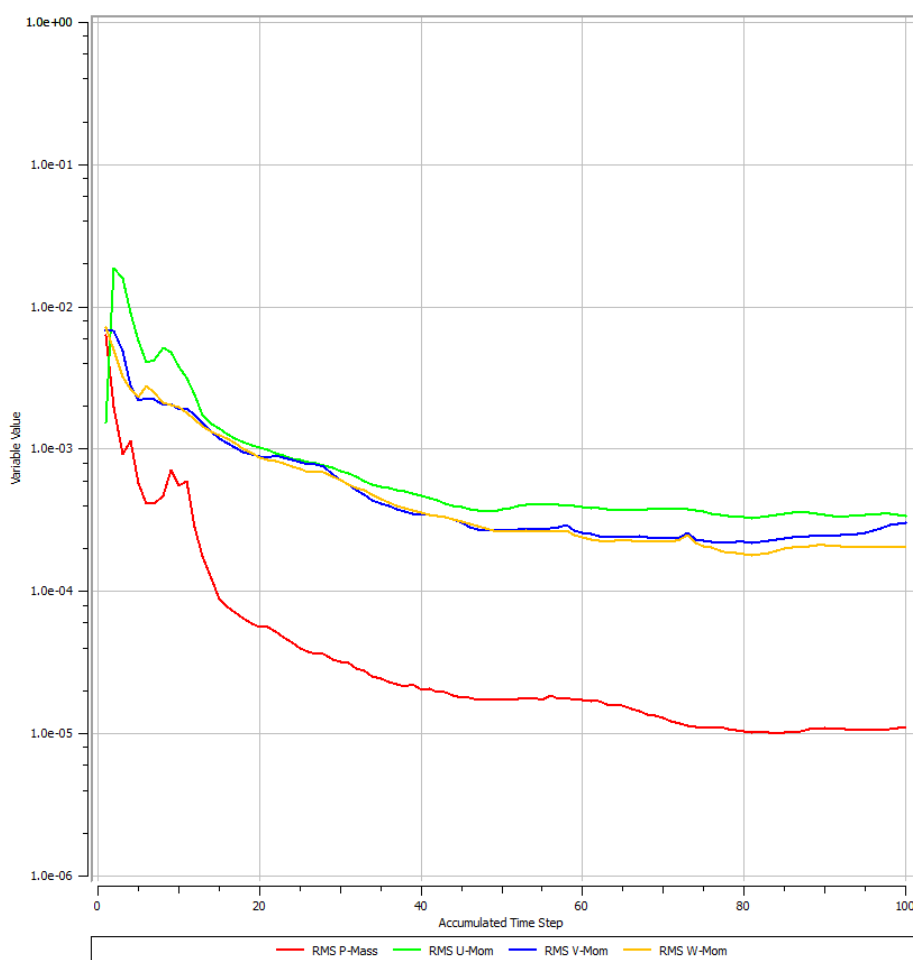
Vytvořená síť konečných prvků je téměř totožná se sítí na původním modelu, byly použity stejné velikosti prvků a způsoby síťování. Výsledná síť má velikost 5 324 745 elementů.

Okrajové podmínky byly u obou modelů nastaveny naprosto stejně. U modelu s kryty byla navíc na nově vzniklé plochy, na kterých má být kryt, nastavena okrajová podmínka Wall. Ta je nastavena jako adiabatická a tudíž u krytů nebyl uvažován přestup tepla.

Vše ostatní bylo nastaveno stejně jako u prvního modelu.

5.3 Výpočet a výsledky

5.3.1 Průběh výpočtu

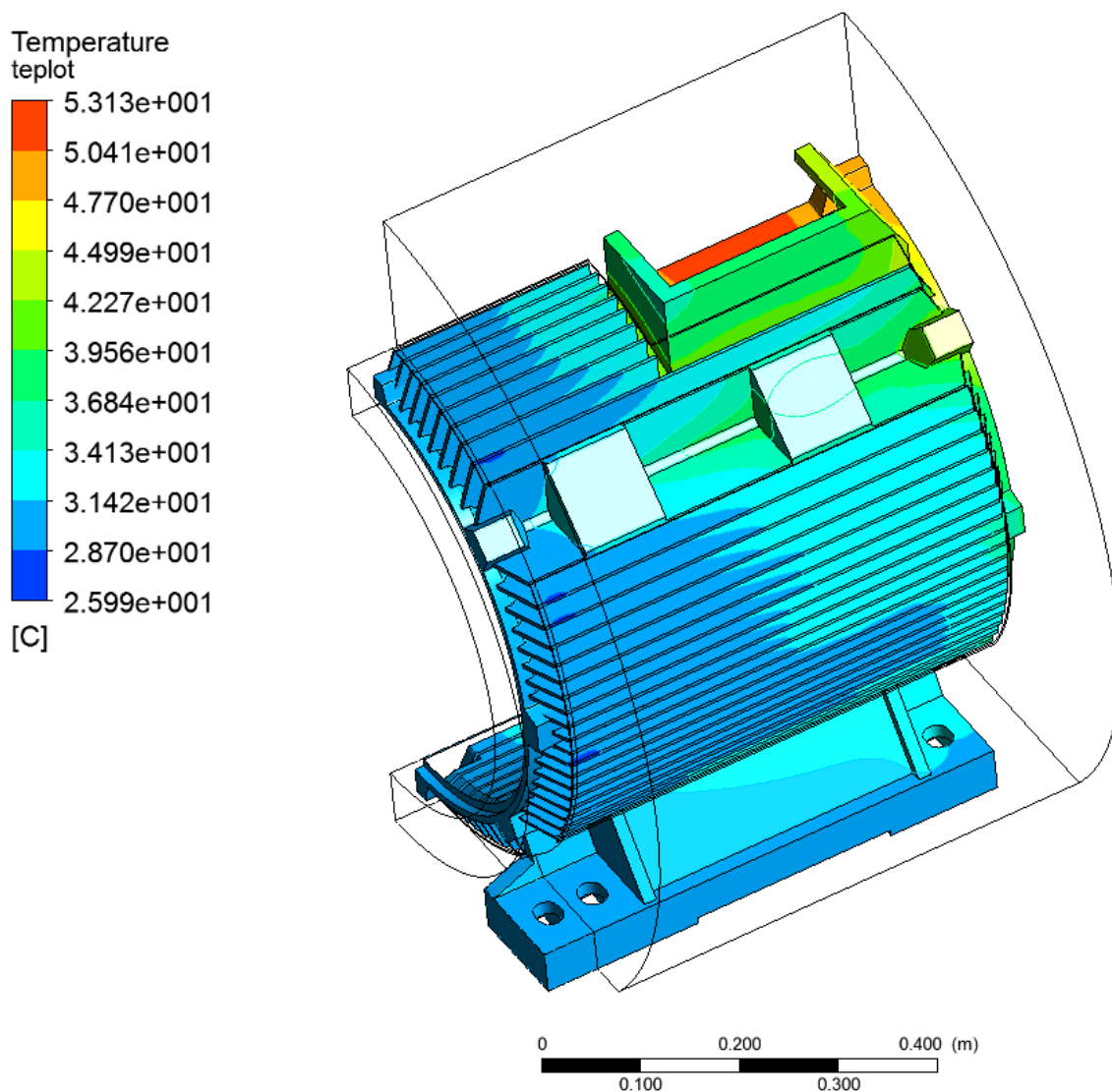


Obr.47 Průběh RMS residuálů pro druhý výpočet

Výpočet, který proběhl úspěšně, trval 4 hodiny a 50 minut.

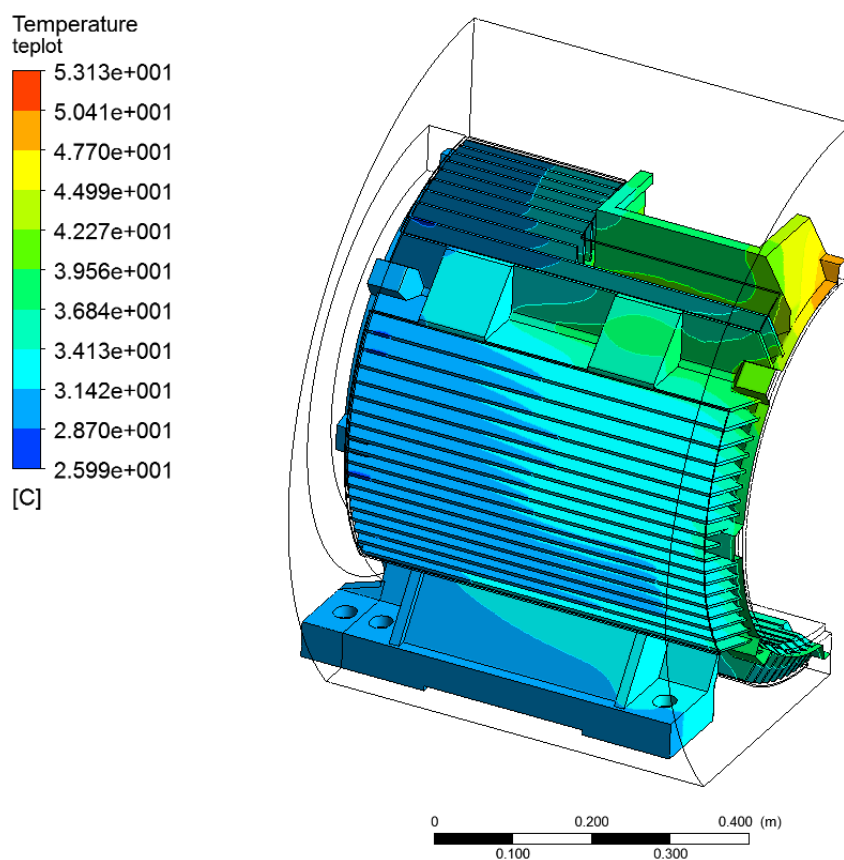
5.3.2 Rozložení teplot na kostře elektromotoru

Pro nový výpočet byl stěžejní tento výsledek, jelikož úkolem upraveného modelu bylo zajistit snížení teplot na kostře elektromotoru.

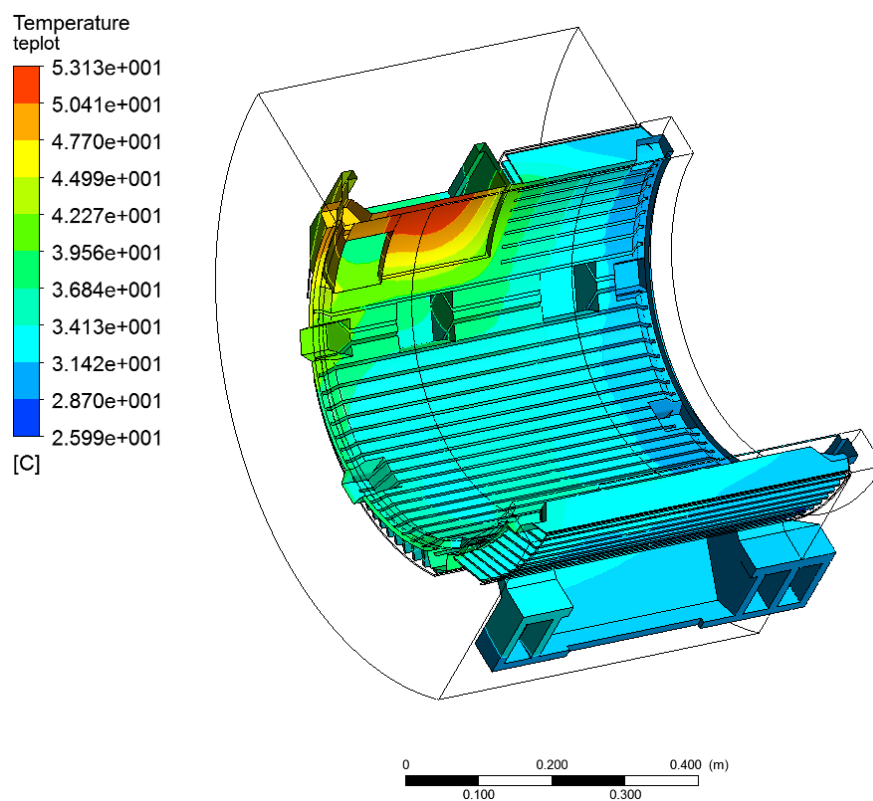


Obr.48 Rozložení teplot na vnější kostře elektromotoru

Na obr. 48 je vidět rozložení teplot na kostře elektromotoru. Oproti původnímu modelu je rozložení na první pohled příznivější a dokonce i teplota v nejkritičtějších místě svorkovnice, kde nedochází k ochlazení vzduchem je o 2 °C nižší.



Obr.49 Rozložení teplot na vnější kostře elektromotoru – pohled zezadu

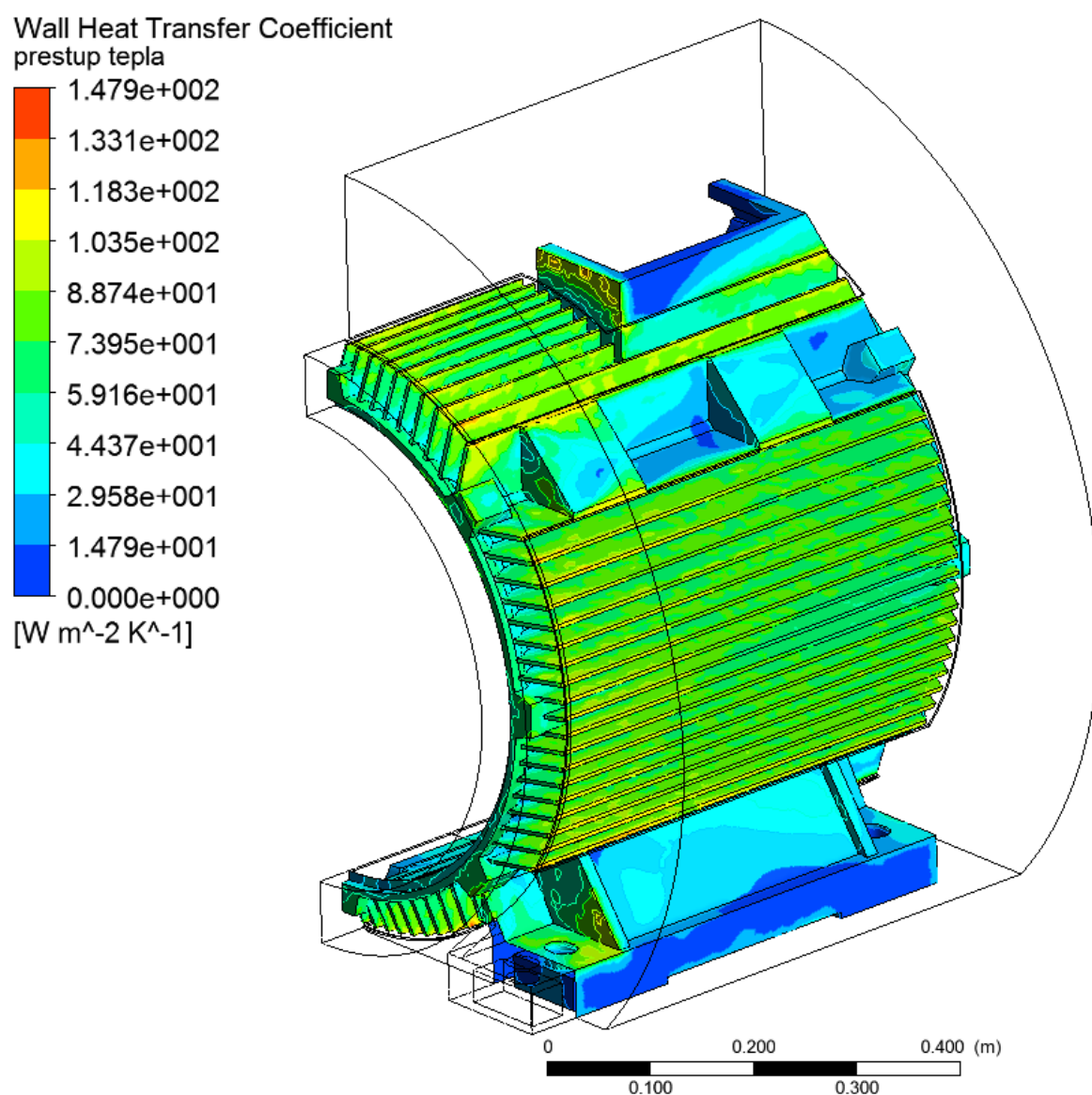


Obr.50 Rozložení teplot na vnější kostře elektromotoru – pohled zevnitř

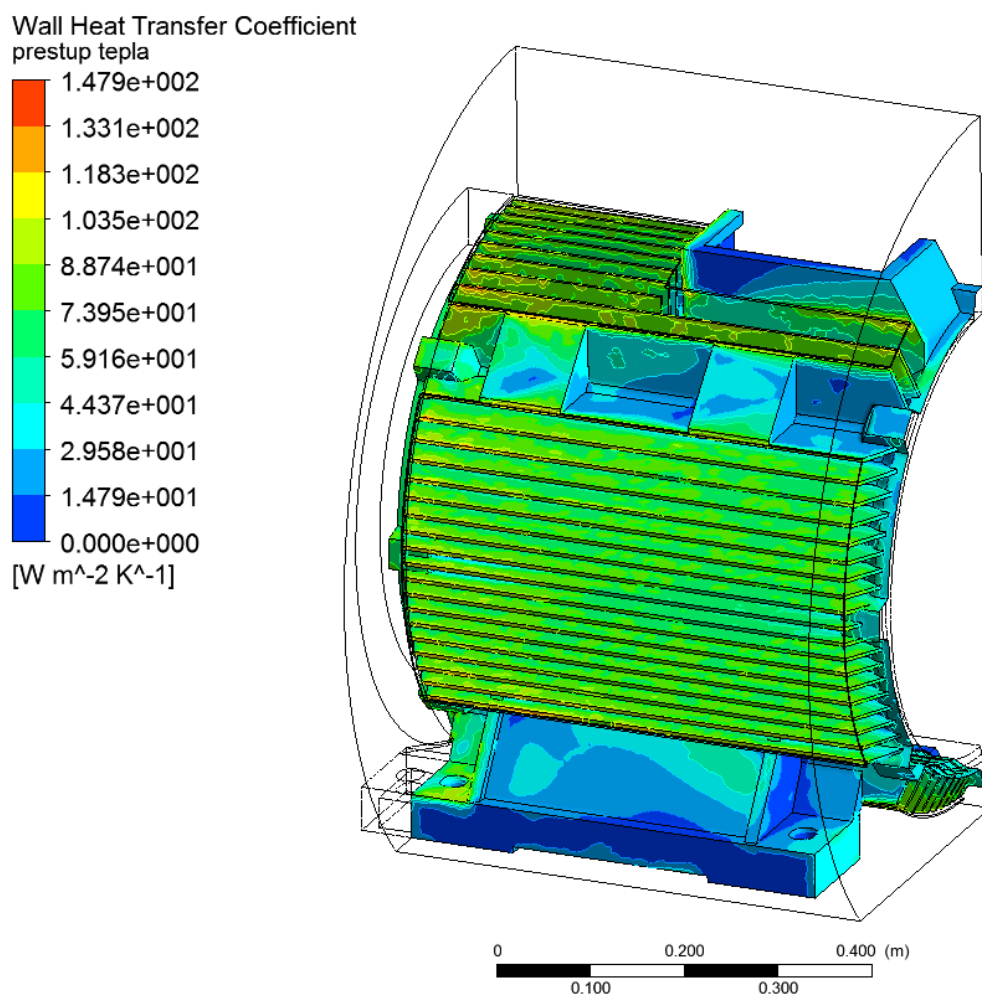
5.3.3 Součinitel přestupu tepla

Při zobrazení součinitele přestupu tepla se nejlépe projeví, jak přidání krytů na motor zlepšilo jeho chlazení. Dosažené výsledky jsou zobrazené na obr. 51 a 52 a lze je považovat za více než dobré.

Žebra kostry elektromotoru, jakožto funkční chladicí část s největší plochou jsou mnohem více využita po celé délce a tím dochází k mnohem lepšímu odvodu tepla.



Obr.51 Součinitel přestupu tepla

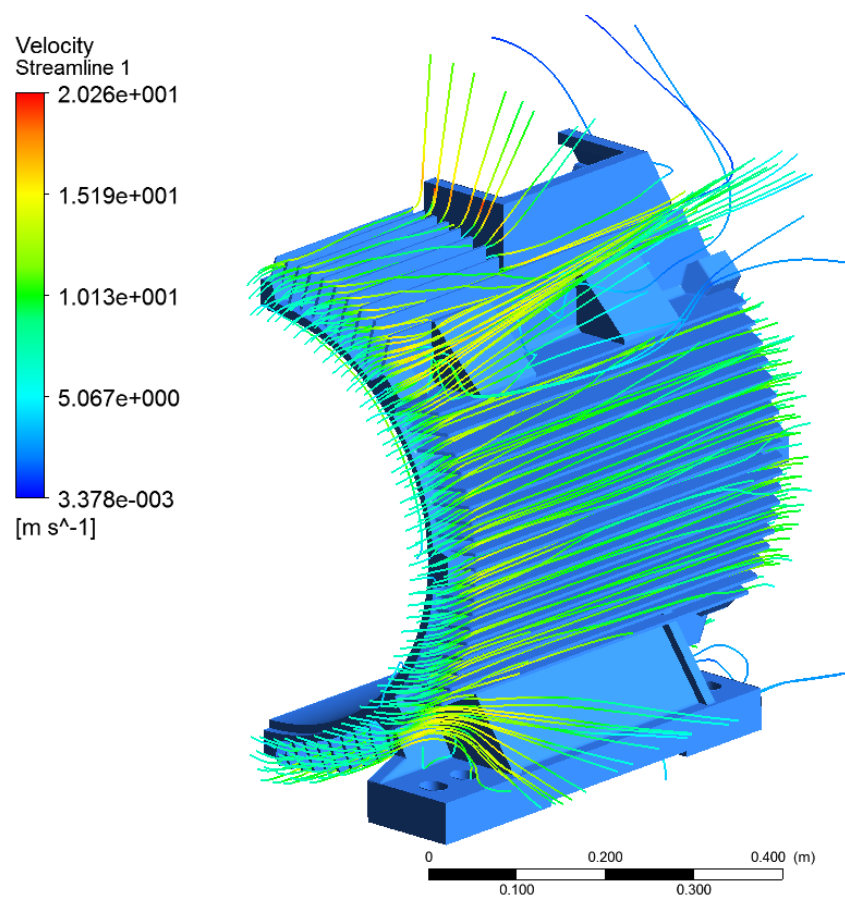


Obr.52 Součinitel přestupu tepla – pohled zezadu

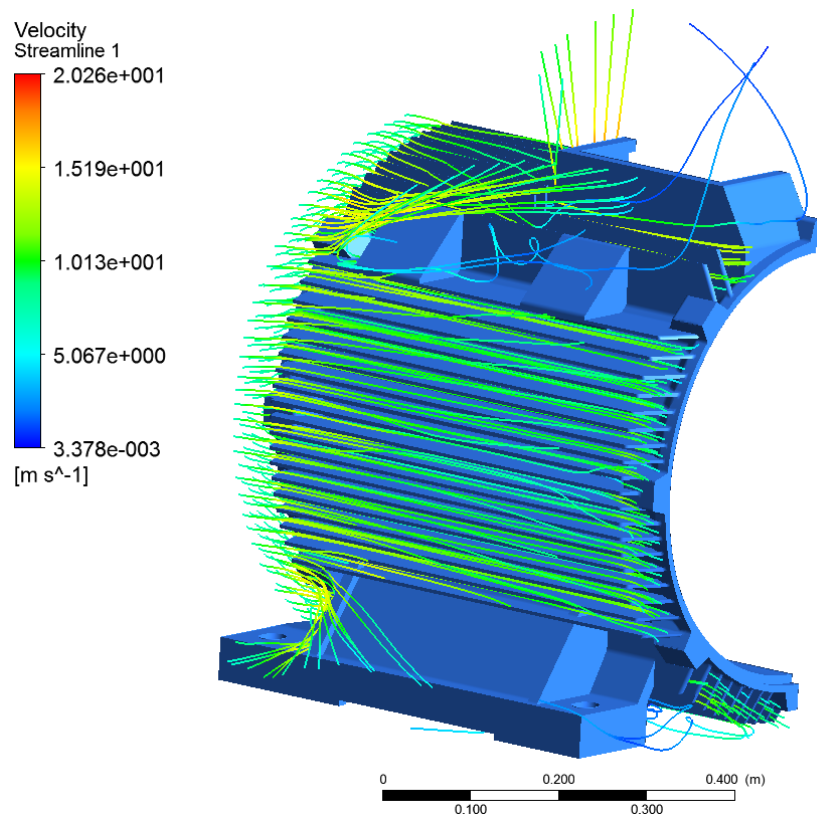
5.3.4 Proudění vzduchu

Při sledování trajektorie proudnic (obr. 53 a 54) je vidět, že většina z nich se drží pod krytem mezi žebry motoru a přispívá tak více ke chlazení motoru. V některých místech, kde je otvor mezi krytem a kostrou je rychlost proudění poměrně vysoká, když se vzduch snaží najít si cestu z modelu ven.

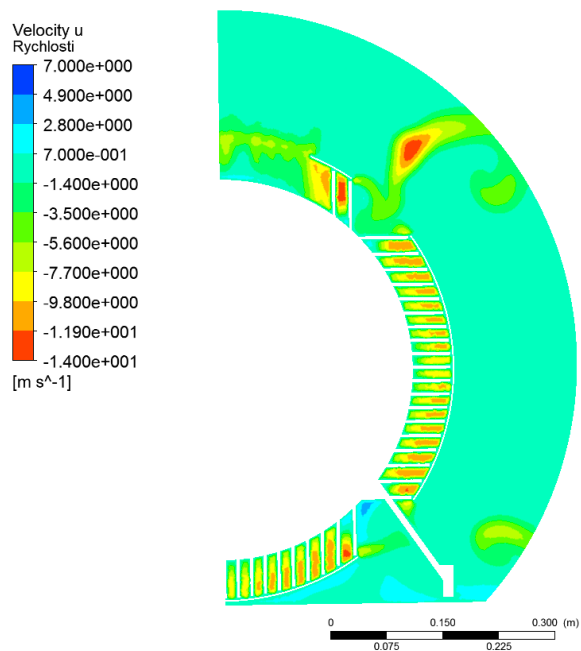
Rychlosti proudění (obr. 55) ve směru osy x jsou opět zobrazeny na vykreslovací rovině (obr. 37).



Obr.53 Trajektorie proudnic



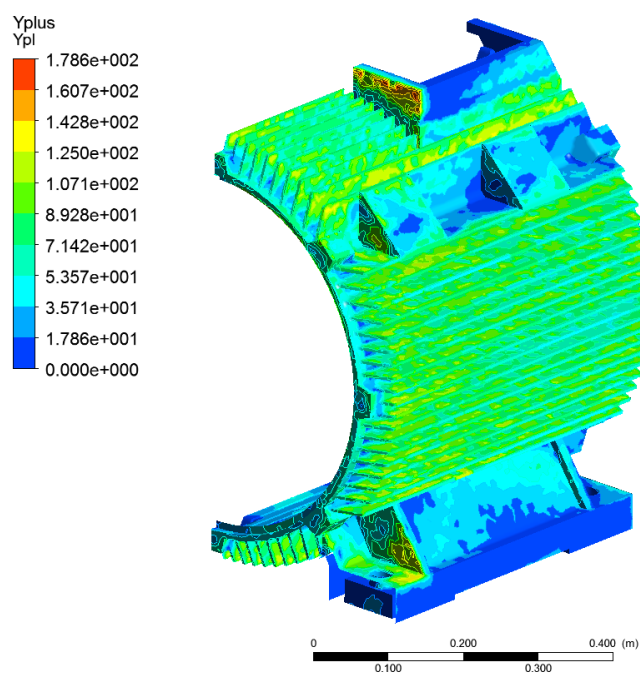
Obr.54 Trajektorie proudnic – pohled zezadu



Obr.55 Rychlost proudícího vzduchu

5.3.5 Funkce Yplus

Jelikož v modelu zůstala téměř stejná síť, není předpokládáno žádné zlepšení funkce Yplus. U optimalizovaného modelu došlo ke zrovnoměnění rozložení po celé délce žeber. To je způsobeno tím, že konec žeber je nyní také mnohem více obtékán vzduchem. Funkci Yplus lze považovat přípustnou s maximální hodnotou 178.



Obr.56 Hodnoty funkce Yplus

5.4 Vyhodnocení výsledků

Jelikož byl model naladěn stejně jako původní motor a jediná změna byla v geometrii, lze výsledky také považovat za správné a navíc porovnatelné s původním modelem.

Nejvyšší teplota se vyskytuje v místě svorkovnice a její hodnota je 53 °C. Tento extrém vznikl v důsledku uzavřené oblasti, do které nemůže proudit vzduch – nedochází k přímému chlazení. Teplota po délce žeber je rovnoměrně rozložená s mírným nárůstem směrem od zdroje vzduchu. Součinitel přestupu tepla je po celé délce kostry motoru u žeber téměř totožný a to ukazuje na využití celé plochy žeber pro odvod tepla z motoru.

Trajektorie proudícího vzduchu kopíruje kostru motoru a většina vzduchu tak díky krytu proudí mezi žebry motoru. Díky tomu může vzduch účinněji chladit i zadní část motoru. Maximální rychlost proudícího vzduchu je v jednom místě až 20 m/s. Vznikla v důsledku úzké mezery mezi novým krytem a původní kostrou.

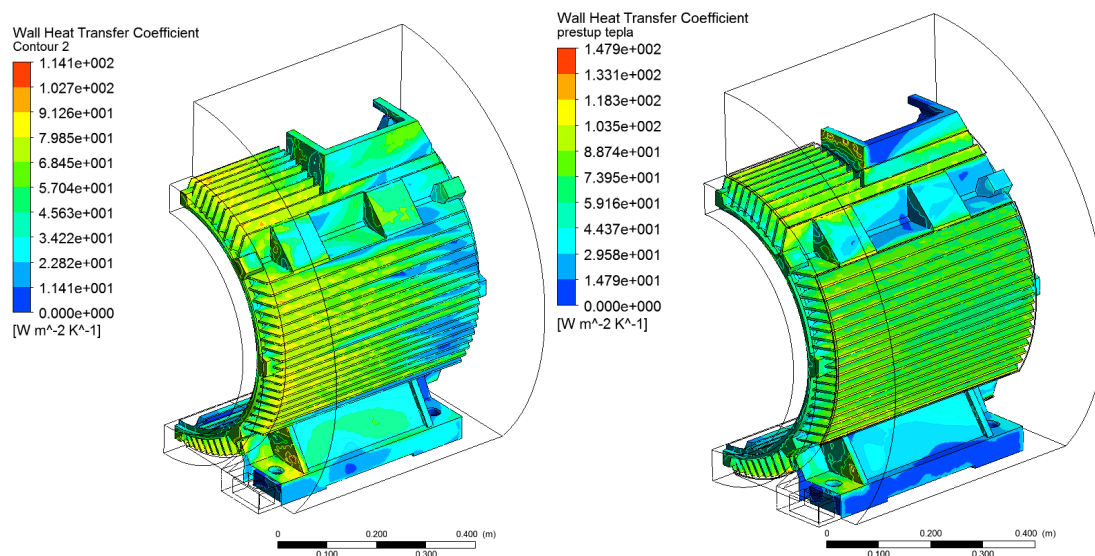
6 Porovnání výsledků a shrnutí

V této kapitole byly vedle sebe postaveny výsledky získané na původní kostře motoru zadané firmou Siemens a na optimalizované variantě s krytem.

Bylo poukázáno na hlavní rozdíly, výhody optimalizovaného modelu a všechny tyto jsou čtenáři vysvětleny a přehledně graficky zobrazeny.

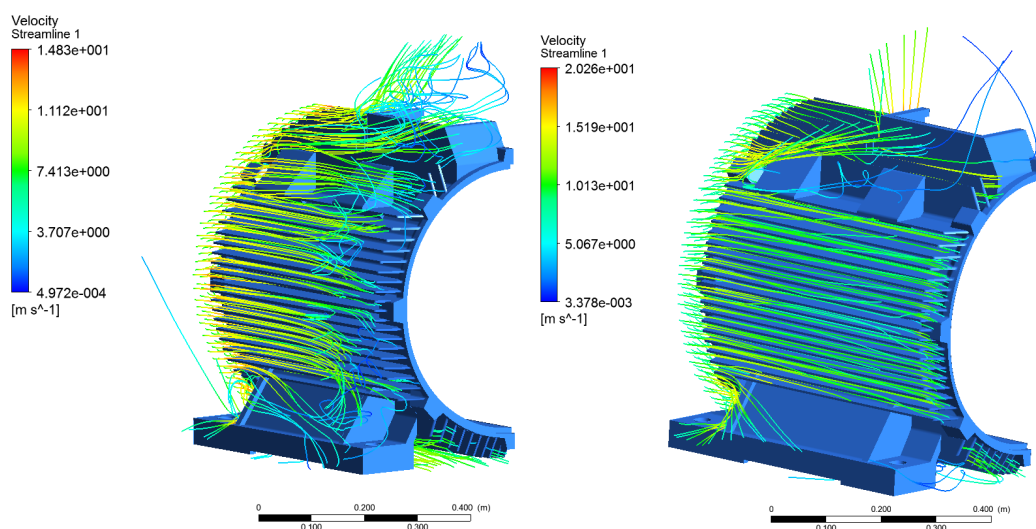
6.1 Účel optimalizovaného modelu

Hlavním účelem optimalizovaného modelu bylo využití žebér po celé délce kostry motoru. Zlepšení je jasně patrné z rozložení součinitele přestupu tepla na původním a optimalizovaném modelu (obr.57).



Obr.57 Součinitel přestupu tepla (vlevo původní model, vpravo optimalizovaný)

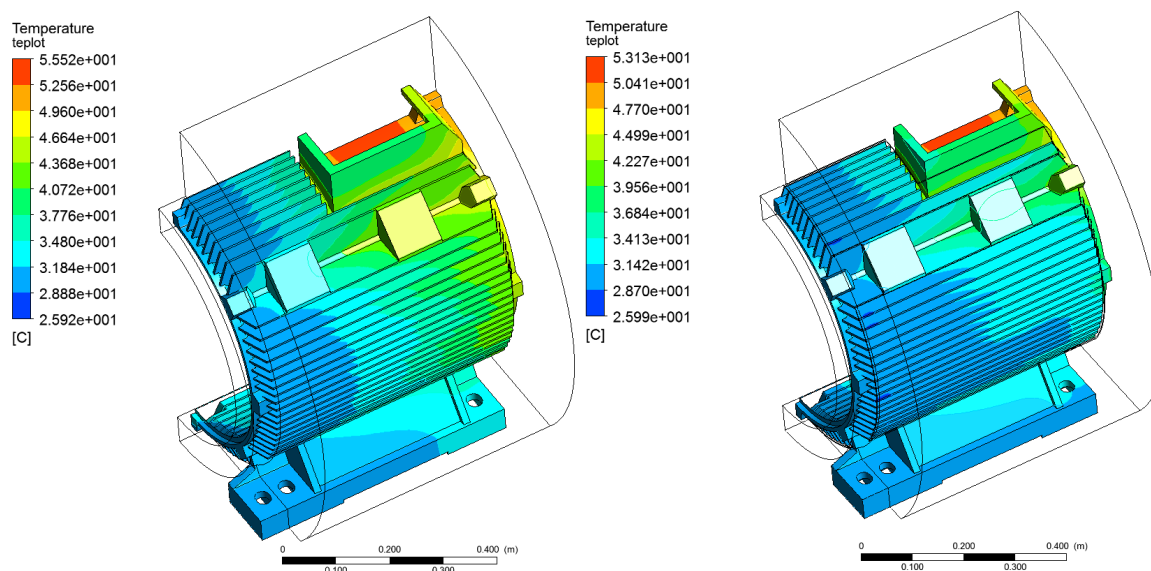
Nyní žebra plní svou chladicí funkci na celé své ploše a model je chlazen mnohem efektivněji. Toho je docíleno lepším prouděním vzduchu v zadní části modelu (obr.58).



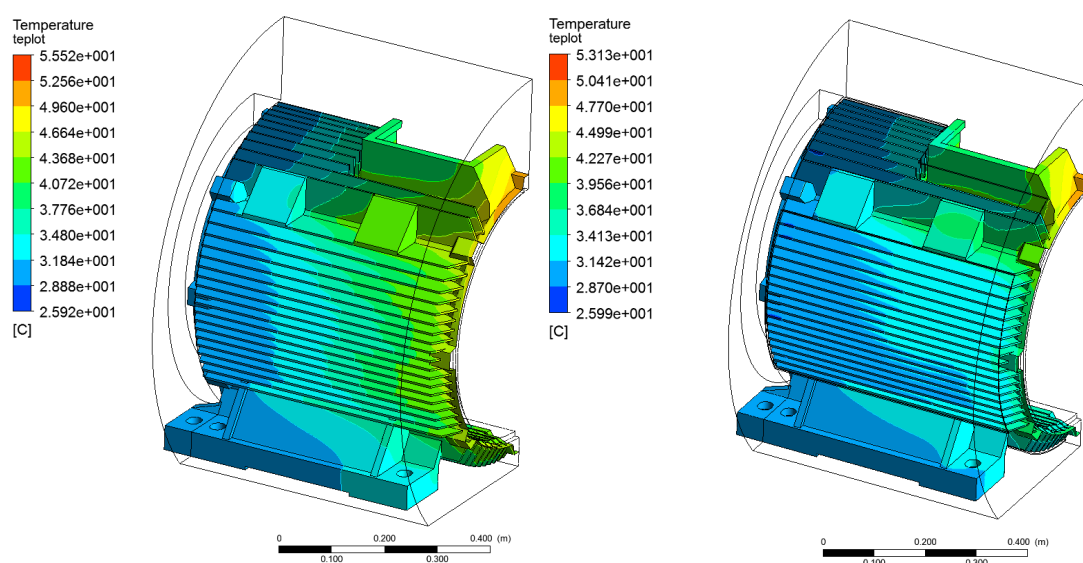
Obr.58 Trajektorie proudnic (vlevo původní model, vpravo optimalizovaný)

6.2 Rozložení teplot

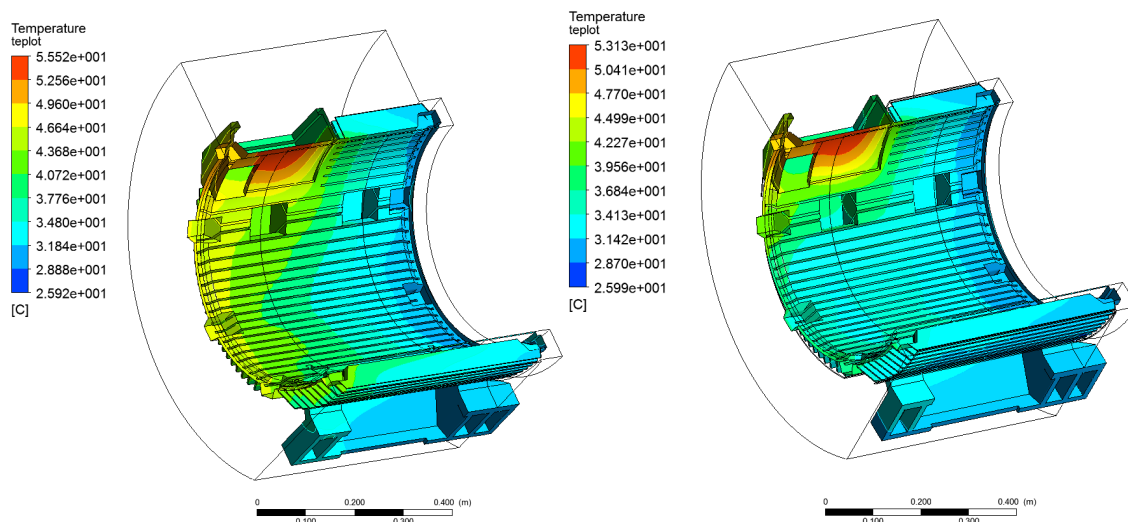
Hlavním úkolem této práce je najít takové technické řešení, aby na optimalizovaném modelu motoru bylo lepší rozložení teplot. Porovnání teplotního pole u obou modelů je na obr. 58-61.



Obr.59 Rozložení teplot – pohled zepředu (vlevo původní model, vpravo optimalizovaný)



Obr.60 Rozložení teplot – pohled zezadu (vlevo původní model, vpravo optimalizovaný)



Obr.61 Rozložení teplot – pohled zevnitř (vlevo původní model, vpravo optimalizovaný)

Z těchto obrázků je jasně patrné snížení teplot u optimalizovaného modelu. Hlavní rozdíl je v rozložení teplotního pole na celé délce žeber, kde byla teplota opravdu výrazně snížena. To ovlivnilo celou kostru a došlo dokonce i ke snížení maximální teploty ve svorkovnici z 55 °C na 53 °C, přestože ta není vzduchem přímo chlazena.

6.3 Shrnutí

Přidání krytů na kostru elektromotoru za účelem efektivnějšího chlazení skutečně vedlo k výraznému snížení teplot a lepšímu rozložení teplotního pole.

CFD analýza prokázala potenciál tohoto technického řešení a dalším logickým krokem by mohlo být vyrobení těchto krytů a experimentální zkouška jejich skutečné účinnosti.

7 Závěrečné zhodnocení

Diplomová práce řešila simulaci chlazení kostry elektromotoru pomocí CFD analýzy. První část této práce rozebírá teorii proudění a přestupu tepla. Byly zmíněny základní matematické rovnice, tedy:

- Konvekčně difúzní rovnice,
- Navier-Stokesovy rovnice,
- zákon zachování hmoty,
- zákon zachování energie

a jejich úpravy, které využívají matematické modely proudění. Důkladně byly popsány modely použité během výpočtu v této práci, tedy RANS modely turbulence, kde se vycházelo z Boussinesquovy hypotézy ke dvourovnicovým modelům až po použitý model k- ϵ . V této části práce je také popsána počítačová CFD analýza proudění, její schéma, možnosti použití a výhody. Pro výpočet práce byl zvolen program Ansys CFX.

Základem a řešeným problémem této práce byla kostra elektromotoru. Tu spolu s množstvím dalších dat, jako je například materiál nebo experimentální měření teplot a jeho výsledky poskytla firma Siemens. Geometrie kostry motoru byla dodána ve formě step souboru (univerzální formát souboru), který může být importován do programu Ansys Workbench. K dodané kostře elektromotoru bylo navíc vytvořeno okolní prostředí, ve kterém dochází k proudění vzduchu. V této části se rozhodlo o rozdělení modelu na polovinu díky jeho symetrii.

Na upravené takto geometrii již mohl být vytvořen CFD model oblasti pro proudění a přestup tepla. Jeho základem bylo rozdělení kostry motoru a oblasti na konečné prvky a objemy. Celý vysíťovaný model má díky využití symetrie 5 320 577 elementů, jinak mohlo být toto číslo a celkový výpočetní čas až 2x větší. Nejdůležitější částí pro správnou funkci výpočetního modelu bylo správné nastavení okrajových podmínek a definování prostředí. Prostorů jsou v modelu 2 – SOLID a FLUID. SOLID je kostra motoru vytvořená ze šedé litiny, FLUID je celá oblast kde proudí vzduch o teplotě 25 °C. Rozhraní mezi těmito prostředími (společné plochy) se nazývá Interface a jeho správné nastavení umožnilo přestup tepla z motoru na vzduch. Na tyto prostředí byly nastaveny okrajové podmínky a jejich přesným popisem a umístěním se zabývá celá jedna část této práce.

Po konečném nastavení a vyladění celého modelu byl proveden finální výpočet. Ten proběhnul během 100 iterací a trval 4 hodiny a 37 minut. Výsledkem výpočtu bylo:

- rozložení teplotního pole na kostře elektromotoru,
- součinitel přestupu tepla na kostře elektromotoru,
- teplota proudícího vzduchu,
- rychlost a trajektorie proudnic proudícího vzduchu
- funkce Yplus.

Nejvyšší teplota se vyskytuje ve svorkovnici a je 55 °C. To je dáno nemožností chladit toto místo vzduchem. Rozložení teplot na žebrech motoru vykazuje nárůst teploty směrem od zdroje chlazení. Součinitel přestupu tepla ukazuje nerovnoměrné chlazení žebry na začátku a na konci kostry motoru a v extrému dosahuje hodnoty 114 W/m²K. Dále bylo zjištěno ohřívání vzduchu v okolí motoru až na teplotu 41 °C. Při vykreslení proudnic vyšlo najevo, že vzduch nezůstává mezi chladícími žebry po celé délce kostry motoru a na konci už jeho proud není tak silný. Maximální rychlost vzduchu v modelu je 14,83 m/s. U rozložení funkce Yplus jsme zjistili maximální hodnotu 178 s průměrem okolo čísla 100. Tato hodnota byla označena jako přípustná.

Při provádění výpočtů u původního modelu byly získány všechna data potřebná pro optimalizaci. Na zobrazených výsledcích se dala odhalit slabá místa modelu a následně mohlo být uvažováno o technickém řešení vedoucím k jejich minimalizaci nebo odstranění. Nejzávažnějším problémem se ukázalo být nerovnoměrné využití ploch žeber k odvodu tepla po délce kostry motoru. Tento problém vznikl v důsledku menšího množství vzduchu, který proudil kolem zadní části kostry motoru. Řešením tohoto problému bylo přidání krytů kolem kostry motoru v místě žeber. Tyto kryty mají za úkol udržet vzduch mezi žebry motoru po celé délce a využít tak k chlazení i zadní část kostry. Po provedení požadovaných úprav geometrie mohl být proveden druhý výpočet. Byl kladen důraz na maximální možnou shodu obou modelů a stejné nastavení okrajových podmínek kvůli možnosti přímého porovnání obou výsledků. Sít' na upraveném optimalizovaném modelu má velikost 5 324 745 elementů a nový výpočet trval 4 hodiny a 50 minut. Při druhém výpočtu vzduch díky přidaným krytům chladil kostru a žebra elektromotoru po celé jejich délce. To je patrné hlavně z rozložení součinitele přestupu tepla, který byl po celé délce žeber v podstatě konstantní. Nejvyšší hodnotou 147 W/m²K podstatně překonal první model. Mnohem důležitějším poznatkem však je výrazné snížení teplot kostry elektromotoru a to především jeho žeber. Dokonce i maximální teplota v místě, kde k chlazení vzduchem vůbec nedochází, vlivem příznivějšího rozložení teplot klesla z 55 °C na 52 °C. Použití navržených krytů kostry elektromotoru zlepšilo všechny zkoumané parametry, jejich skutečnou účinnost by však bylo vhodné otestovat experimentálně.

8 Použitá literatura

- [1] KOZUBKOVÁ, Milada. VŠB TU OSTRAVA. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. první. Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2491-8.
- [2] Radiace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/S%C3%A1l%C3%A1n%C3%AD>
- [3] BLEJCHAŘ, Tomáš. VŠB TU OSTRAVA. *Turbulence - Modelování proudění - CFX*. první. Ostrava, 2010.
- [4] ANDRYS, M. *Optimalizace výfukového potrubí přeplňovaného zážehového motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída.
- [5] Co je to CFD?. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://flnews.autoroad.cz/technika/35130-co-je-to-cfd/>
- [6] CFD Support. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.cfdsupport.com/proc_cfd.php
- [7] Ansys CFX. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/ansys-cfx>
- [8] PODEŠVA, Jiří, Jan SZWEDA a Zdeněk PORUBA. VŠB-TU OSTRAVA. *Numerická optimalizace tvaru kostry elektromotoru: Optimalizace kostry asynchronního elektromotoru*. Závěrečná zpráva ke smlouvě o dílo, int. č. VŠB 337 710 Ostrava, 2008.
- [9] ANSYS, Inc. Theory Reference [online]. 2004 [cit. 2009-11-01]. Dostupný z WWW: http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/90/ansys/a_thry90.pdf.
- [10] RODI, W. & FUEYO, N. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 5*. 1st ed. Oxford : Elsevier, 2002. 1010 pp. ISBN 0-08-044114-9.

[11] PORUBA, Zdeněk; SZWEDA, Jan. *Flow Problem in Thermal Motor Analysis*. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava : Řada strojní. 2008, vol. LIV, no. 2, s. 109-114. ISSN 1210-0471.

9 Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce **Ing. Zdeňku Porubovi, Ph.D.** za jeho čas, zkušenosti a všechny názory, které byly neocenitelné při tvorbě této práce.